

Kuljetustoimintojen resurssointi häiriötilanteissa

Mat-2.4177 Operaatiotutkimuksen projektityöseminaari
Loppuraportti

Alexi Porokka (projektipäällikkö)

Lauri Kauppinen

Touko Väänänen

Olli Niskanen

24. toukokuuta 2015

Sisältö

1	Johdanto	1
1.1	Tausta	1
1.2	Tutkimusongelma ja tavoitteet	2
1.3	Työn rajaus	3
1.4	Työn toteutus ja raportin rakenne	4
2	Metodologia	5
2.1	Kirjallisuuskatsauksen menetelmät	5
2.2	Viitekehys mallien esittelemiseen ja arviointiin	6
2.3	Haastattelumenetelmä	7
3	Varautumiskeinot	8
3.1	Lisäkuljetuskaluston hankkiminen	8
3.2	Vaihtoehtoiset polttoaineet	10
3.3	Automatisoidut autot	10
4	Päätöksentekoa tukevat mallit	12
4.1	Tuotos-panos-mallit	12
4.1.1	Yleinen kuvaus	12
4.1.2	Mallin rajaukset	17
4.1.3	Sisäänmeno- ja ulostulomuuttujat	19
4.1.4	Esimerkkitoteutukset	20
4.1.5	Arviointi ja yhteenveto	21
4.2	Simulointi	23
4.2.1	Mitä on simulointi?	23
4.2.2	Yleinen kuvaus	24
4.2.3	Mallin rajaukset	24
4.2.4	Sisäänmeno- ja ulostulomuuttujat	25
4.2.5	Esimerkkitoteutus	26
4.2.6	Arviointi ja yhteenveto	26
4.3	Huutokauppamekanismit	27

4.3.1	Yleinen kuvaus	27
4.3.2	Mallin rajaukset	27
4.3.3	Sisäänmeno- ja ulostulomuuttujat	28
4.3.4	Esimerkkitoteutus	28
4.3.5	Arviointi ja yhteenveto	28
4.4	Yleistä tietoa optimoinnista	29
4.5	Dynaaminen reititysongelma	31
4.5.1	Yleinen kuvaus	31
4.5.2	Mallin rajaukset	32
4.5.3	Mallin sisäänmeno ja ulostulo	32
4.5.4	Esimerkkitapaukset	33
4.5.5	Arviointi ja yhteenveto	33
4.6	Suurimman peiton ongelma	34
4.6.1	Yleinen kuvaus	34
4.6.2	Mallin rajaukset	35
4.6.3	Mallin sisäänmeno ja ulostulo	35
4.6.4	Esimerkkitapaukset	35
4.6.5	Arviointi ja yhteenveto	36
5	Mallien käyttöä tukevat metodit	37
5.1	Herkkyysanalyysi	37
5.2	Asiantuntija-arvioiden elisitointi	39
6	Yhteenveto ja johtopäätökset	40
A	Itsearvio	47
A.1	Projektin kulku	47
A.2	Projektin työmäärä ja työnjako	47
A.3	Paranneltavaa	48
A.4	Mikä oli onnistunutta	48
B	Haastattelut	49
B.1	Haastattelukysymykset	50

1 Johdanto

1.1 Tausta

Yhteiskunnan toimintojen ja yritysten verkottuminen, sekä taloudellisen kilpailun aiheuttama resurssien yhä tehokkaampi käyttö luo haasteita resurssien¹ jakoon häiriötilanteissa. Häiriötilanteissa yhteiskunnan resurssienjaon tasapainotilanne poikkeutuu äkillisesti, joko lisääntyneen tarpeen, tai vähentyneiden resurssien takia. Polttoainelogistiikan tapauksessa resurssien tarpeen lisääntyminen voi johtua esimerkiksi puolustusvoimien tarpeesta saada säiliöautoja käyttöönsä. Resurssien vähentymiseen voi vaikuttaa esimerkiksi kauppasaarto, jolloin öljyä ei enää saada Suomeen yhteiskunnan tarvitsemaa määrää.

Erityisesti puolustusvoimien kohtaama ongelma häiriötilanteessa on lisääntynyt resurssitarve. Jos puolustusvoimat tarvitsee äkillisesti lisää säiliöautoja käyttöönsä, otetaan ne siviiliyhteiskunnalta. Siviiliyhteiskunnan säiliöautot ovat kuitenkin yleensä erittäin tehokkaassa käytössä, jolloin kuljetuskaluston takavarikointi aiheuttaa häiriöitä siviiliyhteiskunnan toimintoihin. Puolustusvoimat on kuitenkin riippuvainen siviiliyhteiskunnan tuottamista palveluista, minkä vuoksi puolustusvoimien täytyy varmistua siitä, etteivät siviiliyhteiskunnan toiminnot kärsi säiliöautojen takavarikoinnista liikaa ja siten vaaranna puolustusvoimien toimintakykyä.

Siviiliyhteiskunnan täytyy kyetä tuottamaan palveluita kansalaisille häiriötilanteessa eikä kaikkia resursseja voi siis suunnata puolustusvoimille. Yritysten riippuvuussuhteiden kasvaessa pienelläkin häiriöllä systeemin tiettyyn osaan voi olla kauaskantoisia seurauksia, jotka tulisi ottaa huomioon öljynkuljetuskapasiteettia jaettaessa. Yritysten jatkuvuussuunnittelun kannalta yritysten on tärkeää tietää mikäli heidän säiliöautonsa pakkolunastetaan, minkä vuoksi tarvitaan myös selkeät suunnitelmat, joissa kerrotaan mitkä säiliöautot

¹Tässä tapauksessa resursseilla tarkoitetaan käytännössä polttoainelogistiikan erikoiskuljetuskalustoa ja niiden ajamiseen erikoistuneita kuljettajia.

otetaan tarvittaessa puolustusvoimien käyttöön.

1.2 Tutkimusongelma ja tavoitteet

Tämä projektityö toteutettiin keväällä 2015 Aalto-yliopiston perustieteiden korkeakoulun Operaatiotutkimuksen projektityöseminaari - kurssilla. Aiheen projektityölle asetti Puolustusvoimien tutkimuslaitos (PVTUTKL) yhteistyössä Huoltovarmuuskeskuksen (HVK) kanssa. Työn toteutuksesta vastasi neljän hengen opiskelijaryhmä, joista jokaisella oli pääaineenaan systeemi- ja operaatiotutkimus.

Osa tilaajaorganisaatioiden toimenkuvaa on miettiä, kuinka polttoainelogistiset resurssit tulisi allokoida siviili- ja viranomaistahojen kesken häiriötilanteessa, jossa resurssien käyttötarve on kasvanut tai jakautuu huomattavasti normaalista poikkeavalla tavalla. Ohjausryhmätapaamisten perusteella asetettiin tälle projektille tutkimuskysymykset, jotka ovat olennaisia ongelmia, joihin tilaajat pyrkivät löytämään vastauksia, ja joihin vastaaminen on olennaista resurssien allokointiin liittyvässä suunnittelussa ja päätöksenteossa. Tarkemmin ottaen tutkimuskysymyksiksi valittiin seuraavat:

1. Kuinka yhteiskunta voi varautua etukäteen vakavan häiriötilanteen aiheuttamiin polttoainelogistisiin ongelmiin?
2. Kuinka rajoitetut polttoainelogistiset resurssit tulisi jakaa vakavassa häiriötilanteessa viranomaisten ja muun yhteiskunnan kesken?

Projektin tavoitteiden mukaan ryhmän tulisi:

1. Tuottaa kirjallisuuskatsaus menetelmistä, joiden avulla voidaan vastata ainakin osittain tutkimuskysymyksiin yllä ja näin tukea tilaajien työtä sekä laajemmin päätöksentekoa liittyen rajoitettujen polttoainelogististen resurssien allokointiin häiriötilanteissa
2. Arvioida menetelmien käytännöllistä arvoa implementoitavuuden, solveltavuusalueen sekä tulosten merkittävyyden ja luotettavuuden kan-

nalta

3. Luoda katsaus työkaluihin, joilla voidaan tukea esitettyjen menetelmien käyttöönottoa ja käyttöä

Yleisemmin katsoen tavoitteena on tuoda tilaajan tietoon uusia ajattelutapoja ja operaatiotutkimuksen menetelmiä sekä tarjota riittävästi tietoa ja lähdemateriaalia jatkotutkimushankkeiden aloittamisen suunnittelemiseksi. Tavoitteena siis ei ole esimerkiksi implementoida yhtäkään päätöksentekoa tukevaa mallia. Implementointi on kuitenkin mahdollista totetuttaa tilaajaorganisaatioiden toimesta myöhemmin esimerkiksi logistiikkajärjestelmään ja viranomaisyhteistyöhön liittyvissä harjoituksissa. Siksi mallien soveltuvuuden ja käytettävyyden arviointi oli työssä merkittävässä roolissa.

1.3 Työn rajaus

Laajan ongelmakentän takia työssä päätettiin tehdä seuraavat rajaukset

1. Polttoainelogistiikan tarkastelu rajoitetaan öljynkuljetuskapasiteettiin. Öljynkuljetuskapasiteettia tarkastellaan kriittisenä ja rajoitettuna resurssina. Eri malleissa kapasiteetti voidaan ymmärtää säiliörekkoina tai abstrakteina öljyvirtoina.
2. Tarkastelussa ei oteta huomioon Suomen öljyriippuvuutta muusta maailmasta. Työssä keskitytään siis Suomen sisäisen öljynkuljetuksen tarkasteluun.
3. Työssä otetaan juridiset näkökulmat huomioon vain rajallisesti. Jos selkeitä ongelmia havaitaan niin niistä ilmoitetaan. Kattavaa tarkastelua mallin käyttöönotosta juridisesta näkökulmasta ei tehdä.

1.4 Työn toteutus ja raportin rakenne

Tutkimuksen tavoitteisiin pyritään kirjallisuuskatsauksen, haastatteluiden ja ohjausryhmätapaamisten sekä projektiryhmän oman harkinnan avulla. Kirjallisuuskatsausta tukee riittävän laajan lähdemateriaalipohjan hankkiminta sekä projektiryhmän paneutuminen aiheeseen. Haastattelut ja ohjausryhmätapaamiset auttavat projektiryhmää projektin suunnittelussa ja toteutuksessa tarjoten ohjausta ja validointia projektin suunnalle sekä lisää näkemystä tilaajien ongelmakentästä. Projektiryhmän omaa harkintaa ja asiantunteudesta hyödynnetään löydettyjen menetelmien arvioimisessa.

Työssä aihetta tarkastellaan kahdesta eri näkökulmasta. Ensin tutkitaan erilaisia tapoja varautua häiriötilanteisiin. Varautumiskeinoilla yritetään estää häiriötilanteiden eskaloituminen niin vakaviksi, että kriittisiä resursseja joudutaan ylipäättään jakamaan, mutta myös tarjoamaan päätöksenteon tukea vakavan häiriötilanteen ongelmiin. Työssä käydään myös läpi malleja, joilla voidaan selvittää ja perustella kuinka kriittiset polttoainelogistiset resurssit tulisi jakaa vakavassa häiriötilanteessa puolustusvoimien ja muun yhteiskunnan välillä.

Raportin rakenne on seuraava. Kappale 2 esittelee kirjallisuuskatsaukseen sekä mallien esittelyyn ja arviointiin käytettävää metodologiaa. Projektin tulokset eli löydetyt varautumiskeinot, potentiaaliset päätöksentekoa tukevat mallit, sekä mallien käyttöä tukevat menetelmät esitellään kappaleissa 3-5. Kappale 6 tiivistää projektin tulokset ja sisältää pohdinnan mahdollisista jatkotutkimuksen kohteista. Liite A sisältää projektiryhmän itsearvion projektin suorittamisesta. Liite B sisältää yhteenvedon suoritetuista haastatte- luista.

2 Metodologia

Tämä kappale on jaettu kolmeen osaan. Kappale 2.1 kuvaa kuinka projektin keskeisenä osana ollut kirjallisuuskatsaus suoritettiin. Viitekehys tarkemmin tutkittujen matemaattisten mallien esittelemiseen ja arviointiin esitellään kappaleessa 2.2. Kappaleessa 2.3 kerrotaan kuinka projektia varten tehdyt haastattelut toteutettiin.

2.1 Kirjallisuuskatsauksen menetelmät

Kirjallisuuskatsaus suoritettiin vapaamuotoisena. Projektin alkuvaiheessa ryhmän jäsenet suorittivat vapaamuotoista hakua, jonka tarkoituksena oli saada jatkoa ajatellen riittävä näkemys laajasta tutkimuskentästä ja identifioida malleja tai malliluokkia, joihin syventyminen tuntuisi mielekkäältä, toteuttavalta ja tilaajan etua palvelevalta. Teknisesti hakuun käytettiin Google Scholar-hakukonetta sekä tieteellisiä artikkeleita julkaisevien kustantamoiden operoimia hakukoneita kuten Elsevierin ScienceDirect:ia. Käytetyt hakusanat vaihtelivat merkittävästi, eikä yhtä tai muutamaa hakusanaa käytetty dominoivasti.

Kun projektiryhmä oli identifioinut riittävästi mielenkiintoisia malleja ja menetelmiä, suoritti kukin jäsen tarkemman katsauksen valitsemastaan aiheesta (kappale 4). Huomautettakoon, että tässä kirjallisuushaun toisessakaan vaiheessa ei suoritettu mekaanista, kaiken kattavaa hakua käyttäen esimerkiksi tiettyä tai tiettyjä hakusanoja, vaan ryhmän jäsenet suorittivat katsauksen parhaaksi näkemällään tavalla. Tämä tarkoittaa myös sitä, että seuraavassa esitellyt katsaukset eri malleihin eivät ole kaiken kattavia, vaan niiden tarkoituksena on tarjota tilaajalle johdanto valittuihin menetelmiin. Myös ennakoitimenetelmiin tutustuminen (ks. kappale 3) toteutettiin vapaamuotoisen ja eksploraatiivisen kirjallisuuskatsauksen avulla.

Mallien käyttämistä tukevien menetelmien osalta pyrittiin löytämään laaja-

alaista oppikirja- tai referenssimateriaalia, jonka pohjalta on mahdollista tarjota hyvä jatkopolku tämän raportin lukijoille ja jatkotutkimuksen suorittajille.

2.2 Viitekehys mallien esittelemiseen ja arviointiin

Työssä tarkemmin tutkittujen mallien analysoimisen sekä tämän raportin lukemisen helpottamiseksi kehitettiin viitekehys, jonka avulla tarkasteluun valitut mallit esitellään ja arvioidaan kappaleessa 4. Koska yksi työn tarkoituksista on tuoda tilaajien tietoisuuteen uusia ja mahdollisesti hyödyllisiä matemaattisia päätöksenteon tukemisen välineitä, arvioida kyseisten välineiden sopivuutta ja käytettävyyttä polttoainelogistiikan resurssien allokointiin liittyvään päätöksentekoon sekä tarjota perusta välineiden soveltamiseen liittyvään jatkotutkimukseen, tukee viitekehys projektityötä siten, että sen avulla mallien tarkastelu voidaan tehdä perusteellisella, tilaajan tarpeisiin sopivalta ja selkeästi kommunikoitavalla tavalla. Viitekehys syntyi pitkälti projektiryhmän oman ajattelutyön tuloksena ja sen sopivuus sekä työn tavoitteisiin että tilaajan tarpeisiin nähden varmistettiin ohjausryhmätapaamisessa, jonka tuloksena viitekehystä myös muokattiin saadun palautteen ja uusien näkökulmien pohjalta.

Ylätasolla viitekehys jakautuu viiteen osaan: yleiseen kuvaukseen, mallin rajauksiin, sisääntulo- ja ulosmenomuuttujiin, mahdollisiin esimerkkitoteutuksiin sekä arviointiin ja yhteenvetoon. *Yleinen kuvaus* sisältää kuvauksen mallin matemaattisloogisesta rakenteesta, kertoo minkälaisia ilmiöitä sillä voidaan karkeasti ottaen mallintaa, millaisiin kysymyksiin sen avulla voidaan yleisesti katsoen vastata sekä listaa malliin liittyvän keskeisen kirjallisuuden, josta projektin jälkeinen tarkempi syventyminen ja käyttöönotto on hyvä aloittaa. Erityisesti, tässä osiossa selostetaan se, kuinka kyseinen malli voisi olla hyödyllinen projektin tilaajan näkökulmasta katsottuna.

Mallin rajauksilla tarkoitetaan mallin soveltuvuusalueen arvioimista tavalla,

joka on mielekäs ottaen huomioon tilaajaorganisaation tarpeet ja ongelmakenttä. Mallien soveltuvuusalueita tarkasteltaessa käytetään seuraavia ulottuvuuksia: tarkkuustaso, laajuus, aikaväli ja häiriöskenaario. Tarkkuustasolla tarkoitetaan sitä, kuinka tarkasti tarkastelun kohteena oleva systeemi (esimerkiksi kansantalous) on mallinnettu. Laajuudella tarkoitetaan sitä, kuinka suuren osan yhteiskunnasta malli ottaa huomioon. Aikavälillä kuvataan sitä, mikä on mallin käytön kannalta relevantti aikajänne. Häiriöskenaariolla tarkoitetaan sitä, onko mallin uskottava käyttö rajattu vain tiettyjen polttoainelogistiikkaan vaikuttavien häiriötilanteiden tarkastelemiseen.

Sisäänmenomuuttujien suhteen selostetaan tarkasti se, mitä muuttujia ja informaatiota mallin käyttäminen vaatii. *Ulostulomuuttujien* suhteen selvitetään se, mitä tietoa mallista saadaan ulos ja mikä tulkinta saadulla datalla on mallin rakenteen mukaan.

Esimerkkitapausten osiossa esitellään kirjallisuudesta löytyvät mahdolliset esimerkkitapaukset, joissa kyseistä mallia on käytetty. Esimerkkitapaukset luovat uskottavuutta mallin käyttökelpoisuudesta sekä auttavat tuomaan esille käyttöön liittyviä ongelmia ja rajoituksia.

Arvioinnissa ja yhteenvedossa pohditaan mallin positiivisia ominaisuuksia ja seikkoja, jotka saattavat tehdä käyttöönotosta hankalaa. Lisäksi arvioidaan sitä, kuinka mallin antamia tuloksia pitäisi tulkita ja mikä on niiden todellinen arvo polttoainelogististen resurssien jakamiseen liittyvässä päätöksenteossa ja suunnittelussa.

2.3 Haastattelumenetelmä

Projektiryhmä suoritti haastatteluja saadakseen kattavamman kokonaiskuvan projektin ongelmakentästä. Haastattelut olivat semi-strukturoituja. Haastateltaville oli lähetetty kysymykset etukäteen, mutta vastausten perusteella esitettiin mahdollisesti tarkentavia lisäkysymyksiä. Haastateltavat saivat myös esittää näkemyksiään muista ongelmakentän kannalta tärkeäksi koke-

mistaan asioista.

Haastattelukysymykset jaettiin kolmeen eri kategoriaan, nimittäin ongelma-
kentän, nykytilan sekä toimijoiden toiveiden kartoittamiseen. Lisäksi koska
yhden haastateltavan edustama organisaatio (Öljy- ja biopolttoaineala ry) on
yritysten muodostama järjestö, hänelle esitettiin vielä kysymyksiä yritysten
kohtaamasta logistiikkaongelmasta. Liitteessä B on taustatietoa haastatte-
luista, haastattelukysymykset ja yhteenveto haastattelujen vastauksista.

3 Varautumiskeinot

Varautumiskeinojen avulla yritetään valmistautua yhteiskuntaa mahdollises-
ti kohtaavien vakavien häiriötilanteiden aiheuttamiin polttoainelogistisiin on-
gelmiin. Näitä keinoja käyttäen tuetaan koko yhteiskunnan toiminnan kan-
nalta tärkeiden kuljetuspalveluiden toimivuutta ennen vakavia häiriötilantei-
ta, mutta myös niiden aikana. Olemassa olevia varautumiskeinoja ovat muun
muassa polttoaineiden säännöstely ja varmuusvarastointi. Tässä kappalees-
sa käydään läpi mahdollisia uusia varautumiskeinoja, ja arvioidaan niiden
mahdollista vaikutusta Suomen huoltovarmuuteen.

3.1 Lisäkuljetuskaluston hankkiminen

Sheffi (2001) tarkastelee toimitusketjujen hallintaa kriisitilanteiden, erityises-
ti syyskuun 11. päivän terroritekojen, aikana ja tutkii, kuinka kriiseihin voi
valmistautua. Kirjoittaja painottaa, että yksi armeijan pääperiaatteista on
hankkia ylimääräistä välineistöä mahdollisten tulevien kriisien varalle. Tä-
tä ajatusta noudattaen tuottajien pitäisikin kirjoittajan mukaan valmistaa
häätävarasto vakavia häiriötilanteita varten, mutta käytännössä tätä varastoa
voisi myös käyttää tuotantohäiriöiden hoitamiseen, mikäli jokainen hätäva-
rastosta otettu tuote korvattaisiin mahdollisimman pian uudella, ja häiriön
juurisyyt selvitettäisiin.

Suomessa on varauduttu mahdollisiin häiriötilanteisiin varastoimalla polttoainetta eri puolille maata, mutta polttoainekuljetuskapasiteettia ei ole tarpeeksi kattamaan häiriötilanteen tarvetta. Häiriötilanteessa puolustuvoimat joutuukin tukeutumaan muun yhteiskunnan tarjoamiin kuljetuspalveluihin, mikä puolestaan häiritsee elinkeinoelämän toimintaa, sillä elinkeinoelämän käyttämät kuljetusresurssit ovat lähes täydessä käytössä. Edellä esitellyn julkaisun perusteella Suomi voisi parantaa varautumistaan hankkimalla lisää kuljetuskapasiteettia, niin että häiriötilanteen sattuessa logistiikkaresurssija olisi nopeasti saatavilla puolustusvoimien tarpeisiin, ilman että elinkeinoelämä häiriintyy.

Aikoina, jolloin puolustusvoimilla ei ole lisääntyntä tarvetta logistiikkaresurssille, ylimääräinen kuljetuskapasiteetti olisi järkevää antaa muun yhteiskunnan käyttöön. Elinkeinoelämä voisi käyttää kuljetuskapasiteettia mahdollisten kysyntä- ja kuljetushäiriöiden hoitamiseen, mutta se ei voisi luottaa ylimääräisten kuljetusresurssien saatavuuteen kaikkina aikoina. Tämän vuoksi kuljetusresurssija käyttävän yrityksen tulisikin selvittää ja yrittää korjata sen kohtaamat häiriöt, jotta yritys voisi toimia tehokkaasti myös vakavan valtakunnallisen häiriötilanteen aikana, jolloin ylimääräistä kuljetuskapasiteettia ei ole tarjolla.

Mikäli häiriöihin varaudutaan hankkimalla lisää logistiikkaresurssija, on päätettävä miten resurssien hankinta ja ylläpito hoidetaan, kuka niitä hallinnoi ja keiden käytettävissä ne ovat. Käytännössä valtio voisi erilaisin taloudellisin kannustimin yrittää saada yrityksiä hankkimaan lisää kuljetusresurssija, sillä myös yritys hyötyisi niistä puolustusvoimien lisäksi. Kustannus-hyötysuhde tulisi kuitenkin ottaa laajempaan tarkasteluun, jotta hankinnan kannattavuus saataisiin selvitettyä.

Hankittaessa lisäkuljetuskalustoa tulisi selvittää, että mikä on riittävä määrä kalustoa. Tämä olisi varmasti haasteellista, sillä kuljetusresurssien tarve riippuu häiriötilanteista, jotka voivat olla luonteeltaan aivan erilaisia ja vaikeasti ennakoitavissa.

3.2 Vaihtoehtoiset polttoaineet

Vaihtoehtoisia polttoaineita kehitetään jatkuvasti ja niiden avulla riippuvuutta fossiilisista polttoaineista voidaan vähentää. Mahdollisia biopolttoaineita voidaan teoriassa tehdä monista yleisistä raaka-aineista, kuten esimerkiksi kasveista. Mikäli mahdollista, tulevaisuudessa tarvittavat polttoaineet voisi valmistaa lähellä aluetta, jossa polttoaineelle on tarvetta.

Vaihtoehtoisten polttoaineiden avulla olisikin mahdollista vähentää sekä muun yhteiskunnan että puolustusvoimien tarvetta polttoainekuljetuksille. Puolustusvoimien kannalta onkin huomattava, että muun yhteiskunnan vähentynyt kysyntä logistiikkaresursseille saattaisi parantaa resurssien saatavuutta puolustusvoimille, mikäli logistiikkayritykset saataisiin pitämään kiinni olemassaolevasta ylimääräisestä kalustosta. Lähellä tuotetut polttoaineet vähentäisivät myös riippuvuutta ulkomaisista polttoaineista ja niihin liittyvistä kuljetuksista. Tästä esimerkkinä (The New York Times, 2010) kuvailee Yhdysvaltojen asevoimien yrityksiä vähentää riippuvuutta fossiilisista polttoaineista ja polttoainekuljetuksista biopolttoaineiden avulla.

Uusien polttoaineiden kehitys avaa selvästikin uusia mahdollisuuksia puolustusvoimille, mutta pakottaa myös miettimään kuinka puolustusvoimien polttoainehuolto hoidetaan tulevaisuudessa vaihtoehtoisten polttoaineiden käytön lisääntyessä. Erilaiset polttoaineet saattavat asettaa erilaisia vaatimuksia polttoainekuljetuskalustolle, mikä monimutkaistaa puolustusvoimien työtä, kun se yrittää järjestää tarvittavat kuljetusresurssit vakavassa häiriötilanteessa. Laajemmin tarkasteltuna uudet polttoaineet saattavat myös muokata koko toimitusketjua, muun muassa kuljetusreittejä ja varastointia.

3.3 Automatisoidut autot

Automatisoidut autot ovat toinen esimerkki tulevaisuuden teknologioista, jotka luovat uusia mahdollisuuksia yhteiskunnalle ja puolustusvoimille. It-

seohjautuvien autojen kehityskaari näyttää lupaavalta, minkä vuoksi eduskunnan tulevaisuusvaliokunta arvioi, että automatisoidut autot tulevat sarjatuotantoon vuosien 2018 ja 2020 välillä (Linturi et al., 2013). Tulevaisuusvaliokunta kuvailee kuinka henkilöautojen lisäksi myös tavaraliikenteen automatisointi toisi suuria säästöjä niin rahassa kuin ajassa mitattuna. Automatisoidut autot vähentäisivät tarvetta koulutetuille kuljettajille, joista saattaa olla pulaa häiriötilanteen aikana. Itseohjautuvien autojen avulla polttoainekuljetuksia voitaisiin myös ajaa taukoamatta, mikä ei taas välttämättä ole mahdollista ammattikuljettajia käytettäessä. Automatisoitujen autojen ja liikenteen avulla yksityisten logistiikkatoimijoiden olisi siis mahdollista tehostaa toimintaansa. Tämä puolestaan tukisi puolustusvoimia, jotka nojaavat logistiikkatoimijoiden polttoainekuljetuksiin.

Automaation avulla liikenteestä voidaan tehdä ennalta-arvattavampi, mikä helpottaa yhteiskunnan varautumista vakaviin häiriötilanteisiin. PwC arvioi liikenneonnettomuuksien määrän vähenevän 10-kertaisesti autonomisia autoja käytettäessä ja autokannan supistuvan Yhdysvalloissa noin sadasosaan nykyisestä (PwC, 2013). Tällöin esimerkiksi polttoainekuljetukset saapuvat varmemmin perille, mutta myös kulkevat tarkemmin aikataulun mukaisesti. Morgan Stanley puolestaan ennustaa polttoaineenkulutuksen pienenevän selvästi automatisoituja autoja käytettäessä, pääasiassa johtuen paremmin suunnitelluista autoista ja kehittyneemmästä liikenteestä (Business Insider, 2014). Yksittäisten autojen pienempi polttoaineenkulutus mahdollistaa pidemmät ajomatkat, jolloin esimerkiksi ajoneuvoyhdistelmä voi kiertää useamman jakelupisteen kautta yhdellä tankillisella, mikä tehostaa logistiikkajärjestelmän toimintaa. Koko yhteiskunnan pienempi polttoaineenkulutus puolestaan vähentää riippuvuutta ulkomaisista polttoaineentuottajista, mutta myös helpottaa mahdolliseen häiriötilanteeseen valmistautumista Suomessa, sillä tarve polttoainekuljetuskalustolle ja varmuusvarastoidulle polttoaineelle pienee.

On selvää, että puolustusvoimat on hyvin riippuvainen polttoainekuljetuksis-

ta vakavissa häiriötilanteissa. Tämä on itsessään heikkous maanpuolustuksen kannalta, sillä jokin ulkopuolinen taho voi hyödyntää tätä heikkoutta omiin tarkoituksiinsa. Tavalliset polttoainekuljetukset vaativat ammattikuljettajia kulkeakseen, mikä on heikkous, jota automatisoiduissa kuljetuksissa ei ole. Automaatio saattaa puolestaan lisätä häiriöherkkyyttä, sillä esimerkiksi automatisoidut autot ovat hyvin riippuvaisia paikannusteknologiasta.

Tässä kappaleessa kuvatut skenaariot ovat riippuvaisia siitä, kuinka onnistuneesti liikenne saadaan automatisoitua. On myös hyvin vaikeaa ennustaa milloin automaatiosta aiheutuvat kustannukset ovat sellaisella tasolla, että käytännön toteuttaminen on järkevää ja mahdollista. Vaikka kaikki tulevaisuudenkuvat eivät kävisikään toteen, on tärkeää ymmärtää liikenteeseen liittyvien teknologisten kehitysaskelien tarjoamat mahdollisuudet myös huoltovarmuuden kannalta.

4 Päätöksentekoa tukevat mallit

Tässä kappaleessa esitellään tarkemmin tutkitut matemaattiset mallit, jotka voivat auttaa tutkijoita vastaamaan työn tutkimuskysymyksiin. Kukin mallista esitetään ja arvioidaan kappaleessa 2.2 esitellyn viitekehyksen mukaisesti.

4.1 Tuotos-panos-mallit

4.1.1 Yleinen kuvaus

Yhteiskunnan sektorit riippuvat toisistaan. Taloudellisesti katsottuna jokainen yhteiskunnan sektori (esimerkiksi teollisuustuotesektori, tieto- ja viestintäpalvelusektori sekä rahoitus- ja vakuutuspalvelusektori) riippuu usean muun sektorin tuotoksesta. Esimerkiksi teollisuustuotesektori tarvitsee omien palveluidensa tarjoamiseen ainakin kuljetus- ja energia-alan lopputuotteita.

Toisaalta, myös kuljetus- ja energia-ala tarvitsevat muiden sektoreiden tuotoksia omassa toiminnassaan. Abstraktissa mielessä yhteiskunnan talousjärjestelmä voidaan siis kuvata monimutkaisena systeeminä, jossa taloudellisen toiminnan perusyksiköinä toimivat sektorit, joiden tuotantokyvyt riippuvat muiden sektorien kyvyistä tarjota tarvittavia välituotteita. Polttoainekuljetusten ja yleisemmin polttoainehuollon suhde muuhun yhteiskuntaan ei ole tässä suhteessa poikkeustapaus: esimerkiksi vuosien 1973 - 1974 öljykriisissä öljyn tarjonnan merkittävä heikkeneminen maailmanmarkkinoilla johti globaaliin taantumiaan ja osakemarkkinaromahdukseen Yhdysvalloissa (Ra'ed ja Keating, 2014). Syynä tähän oli juuri se, että talouden sektorit tukeutuvat sekä toisiinsa että energiahuoltoon niin paikallisesti kuin myös globaalisti.

Kun mietitään sitä, kuinka rajoitetut polttoainelogistiikan resurssit tulisi jakaa siviiliyhteiskunnan ja viranomaisten kesken häiriötilanteessa, on edellisestä näkökulmasta katsottuna tärkeää ottaa huomioon päätöksistä koituvat kokonaisseuraukset yhteiskunnalle. Kun siviilisektorin käytöstä poistetaan polttoainelogistiikan kapasiteettia, heikkenevät kyseisiä palveluita käyttävät sektorit välittömästi muutoksen vaikutuksena. Tämä taas vaikuttaa muiden sektorien tuotantokykyihin. Alkuperäisen muutoksen eli polttoainelogistiikan resurssien uudelleenjaon seurauksena koko taloudellinen järjestelmä siis siirtyy uuteen tasapainoon sektorien välisten riippuvuussuhteiden ja takaisin-kytkentöjen välityksellä. Jos siis tahdotaan tutkia polttoainelogistiikan resurssien uudelleenallokoinnin kokonaisvaltaisia seurauksia yhteiskuntaan, on ymmärrettävä (i) eri sektorien riippuvuus polttoainelogistiikan resursseista sekä (ii) sektorien riippuvuudet muiden sektorien tuotoksista. Näiden tietojen avulla voidaan mallintaa sekä suorat että epäsuorat seuraukset erilaisista päätöksistä tai allokaatiomalleista.

Leontief (1986) kehitti ja esitteli matemaattisen viitekehyksen kansantalouden mallintamiseksi joukkona toisistaan riippuvia sektoreita. Leontiefin *tuotospanos-mallissa*² tarkasteltava talousjärjestelmä koostuu n :stä sektorista, jot-

²Leontief sai Ruotsin keskuspankin taloustieteen palkinnon Alfred Nobelin muistoksi vuonna 1973 työstään tuotos-panos-mallin parissa (Nobel Media AB, 2014).

ka tuottavat palveluita ja/tai hyödykkeitä sekä toisten sektorien käyttöön (välituotoksina) että loppukäyttäjien tarpeisiin (lopputuotoksina). Yksinkertaisuuden vuoksi oletetaan, että kukin sektori tuottaa vain yhtä homogeenistä tuotetta tai palvelua. Käytetään seuraavaa notaatiota: $x_j = j$:nnen sektorin tuotteen tai palvelun kokonaistuotos³ taloudessa, $j = 1, \dots, n$; $c_j = j$:nnen sektorin tuotteen tai palvelun kysyntä *lopputuotemarkkinoilla*, $j = 1, \dots, n$; $a_{ij} =$ se määrä sektorin i tuotetta tai palvelua, joka tarvitaan yhden yksikön tuottamiseen sektorin j tuotetta tai palvelua, $i, j = 1, \dots, n$. Leontiefin mallin keskeinen yhtälö on

$$x_i = \sum_{j=1}^n a_{ij}x_j + c_i, \quad i = 1, \dots, n. \quad (1)$$

Eräiden realististen ehtojen ollessa voimassa yhtälöstä (1) voidaan ratkaista talouden tasapainoa vastaavat sektorien tuotantomäärät x_j , $j = 1, \dots, n$, kun lopputuotekysynät c_i sekä tekniset kertoimet a_{ij} , $i, j = 1, \dots, n$, tunnetaan. Tämä on vain yksi tapa esittää Leontiefin mallin keskeinen ajatustapa: yllä kuvatusta staattisesta tasapainomallista on lukemattomia versioita ja tuotos-panos-mallista on esitetty ja hyödynnetty myös esimerkiksi dynaamisia versioita, joiden avulla sektorien kokonaistuotosten muutos voidaan kuvata joko jatkuvassa tai diskreetissä ajassa differentiaali- tai differenssiyhtälöiden avulla (Dietzenbacher ja Lahr, 2004).

Vaikka kaikissa tapauksissa tuotos-panos-malli oleellisesti ilmaisee sen, kuinka hyödykkeet virtaavat kansantaloudessa, voidaan sektorit ja niiden tuotokset määritellä useilla eri tavoilla. Yllä oletettiin, että jokainen sektori tuottaa yhtä hyödykettä, jota muut sektorit eivät tuota. Kuitenkin, esimerkiksi Yhdysvalloissa Bureau of Economic Analysis (BEA) tuottaa tuotos-panos-*taulukkoita*, joissa kukin sektori voi tuottaa ja kuluttaa useampaa hyödykettä määrittelystä hyödykeavaruudesta (Haines et al., 2005b). Toisin sanoen, sektoreilla ei enää ole omaa spesifiä hyödykettä. Syy tähän taulukointiin on se,

³Kokonaistuotos voidaan laskea joko rahallisessa arvossa tai muissa fyysiseen määrittelyyn perustuvissa yksiköissä.

että todellisuudessa useat sektorit tuottavat samoja hyödykkeitä, ja jokaisen sektorin tuotoksen yksinkertaistaminen yhdeksi hyödykkeeksi on hyvin rajoittava oletus. Tämän implikaatio on se, että tutkijat, jotka haluavat hyödyntää mallintamisessaan BEA:n valmiita tuotos-panos-taulukoita, joutuvat käyttämään tuotos-panos-malleja, joiden rakenne eroaa mallista (1). Ajatus mallinnuksen takana pysyy kuitenkin samana.

Tuotos-panos-mallit sopivat sellaisenaan hyvin eri sektoreiden välisten riippuvuussuhteiden analysointiin. Niiden avulla voidaankin vastata kansantalouden toimintaan liittyviin ”Mitä jos?”-kysymyksiin muuntelemalla mallin parametrien arvoja ja laskemalla talouden uusi tasapaino. Erityisesti, tuotos-panos-mallien avulla voidaan tutkia mitä tapahtuu, jos esimerkiksi jonkin hyödykkeen kysyntä kokee muutoksen alkuperäisestä tasapainoarvosta.

Haines et al. (2005b) pyrkivätkin mallintamaan esimerkiksi terroristi-iskujen vaikutuksia talouteen ajatuksenaan muokata mallin (1) kysyntävektoria $(c_1, \dots, c_n)^T$ (ks. myös Haines ja Jiang (2001) sekä Haines et al. (2005a)). Kuitenkin, ottaen huomioon tämän projektin tavoitteet, mallit, joissa muutos alkaa kysynnän muutoksesta, eivät ole välttämättä sopivia. Syynä on se, että niissä häiriötilanteissa, joiden vaikutusten torjumisen suunnitteluun tämän työn on tarkoitus auttaa, pullonkaulana ei ole kysyntä vaan tarjontapuolen kapasiteetti.

Percoco (2006) tiedostaa tämän puutteen ja pyrkii mallintamaan myös häiriöiden vaikutusta talouden tarjontapuoleen. Percoccon ajatus on yksinkertaistettuna muuntaa teknisten kertoimien a_{ij} arvoja mallissa (1). Kuitenkin on luultavaa, että kyseisten kertoimien arvojen muunteleminen perustellulla tavalla on hankalaa ja teknisten kertoimien arvojen muuntaminen ei ole intuitiivinen tai selkeä tapa kuvata tuotantopullonkaulojen vaikutuksia talouteen.

Hallegatte (2008) esittää tuotos-panos-mallin, jonka avulla voidaan mallintaa myös tarjontapuolen pullonkaulat ja se, kuinka eri sektorit ja loppukäyttäjät sopeutuvat siihen, että tiettyjen tuotteiden kokonaiskysyntöjä ei kyetä

täyttämään. Hallegatten malliin sisältyy myös kysynnän komponentti, joka kuvaa pullonkaularesursseihin investoimista tuotantokyvyn palauttamiseksi. Hallegatten mallilla voidaan siis kuvata ajassa sektorimallin viitekehyyksessä koko muutosprosessi, joka alkaa ulkoisista tekijöistä johtuvasta tarjontapuolen heikkenemisestä. Erityisen mielenkiintoista Hallegatten mallissa on se, että pullonkaulahyödykkeet voidaan jakaa väli- ja lopputuotekysyntään mallintajan valitsemalla tavalla, jonka tulee käytännössä olla ohjelmoitavissa oleva prioriteettijärjestys.

Arvioimme, että kirjallisuudesta löydetyistä tuotos-panos-malleista Hallegatten malli olisi käyttökelpoisin pohja mallille, jota tilaaja voisi käyttää oman työnsä tukemana. Oletetaan, että häiriötilanteen sattuessa viranomaisen tarve polttoainelogistiikan resursseille kasvaisi siten, että normaaliolojen resurssit eivät riittäisi kasvaneelle kokonaiskysynnälle. Tällöin olisi siis kyse tarjontapuolen pullonkaulasta - voitaisiin esimerkiksi tulkita, että polttoainelogistiikkasektorin tuotantokyky on rajoitettu. Hallegatten mallin tilanteeseen sopivalla implementaatiolla voitaisiin tukea tutkimuskysymyksiin vastaamista ainakin seuraavin tavoin.

- Tutkimuskysymykseen 1 vastaamista voidaan tukea:
 - Mallintamalla kuinka paljon sektorien polttoaineriippuvuuksien vähentäminen etukäteen pienentää taloudellisia seurauksia häiriöistä
 - Mallintamalla kuinka suuri taloudellinen etu häiriötilanteessa on polttoainelogistisen kokonaiskapasiteetin lisäämisellä
 - Arvioimalla eri sektorien taloudellisia riippuvuuksia polttoainelogistiikasta, jolloin etukäteisvarautuminen voidaan kohdentaa järkevästi
 - Mallintamalla kuinka suuri taloudellinen hyöty on sopeutumiskyvyn parantamisesta. Sopeutumiskyvyllä tarkoitetaan kyvykkyyttä muuntaa tuotantoteknologiaa siten, että polttoainelogistiikkaa

voidaan korvata jollain paremmin saatavilla olevalla tuotannontekijällä

- Tutkimuskysymykseen 2 vastaamista voidaan tukea:
 - Simuloimalla, mitä taloudellisia vaikutuksia on erilaisilla keinoilla priorisoida polttoainelogistiikan resurssien saatavuutta eri sektorien kesken
 - Identifioimalla, mitkä sektorit kärsivät eniten rajoitetusta polttoainelogistiikan saatavuudesta
 - Muodostamalla kokonaiskuva siitä, kuinka talouden eri sektorit kärsivät suoraan ja epäsuoraan polttoainelogistiikan pullonkaulasta

Koska koemme Hallegatten mallin olevan soveltuvin tilaajan tarkoituksiin, käytetään tästä mallista vastedes nimeä sektorimalli ellei erikseen muuta mainita. Parhaan lähtökohdan jatkotutkintoihin liittyen Hallegatten malliin antavat (Hallegatte, 2008) ja (Henriet ja Hallegatte, 2008).

4.1.2 Mallin rajaukset

Tuotos-panos-mallit kuvaavat tyypillisesti yhteiskunnan karkealla tasolla, sillä niissä taloudellisen toiminnan perusyksikkö on sektori. Toisaalta, sektorit voidaan määritellä kuinka tahansa. Käytännössä rajoitteena tarkkuuteen on tuotos-panos-taulukoiden saatavuus, sillä taulukot antavat ehdottomasti uskottavimman lähtökohdan mallien soveltamiseen. Lisäksi mallien käyttöön liittyvän datan kerääminen alusta lähtien olisi varmasti yksittäiselle tutkimukselle erittäin paljon resursseja vaativa tehtävä. Näin ollen mallin tarkkuus on epäsuorasti relevantin tilastollista dataa keräävän instanssin määrittelemä. Esimerkiksi, Tilastokeskus kerää ja julkaisee tuotos-panos-taulukoita Suomen kansantaloudesta (Tilastokeskus, 2014). Tilastokeskuksen taulukoissa Suomen talouden rakenne on kuvattu 64 toimialan ja 64 tuoteryhmän

tarkkuudella

Tuotos-panos-malleilla voidaan kuvata joko koko yhteiskunta tai vain esimerkiksi maantieteellinen osa siitä. Tässäkin kohtaa datan saatavuus on useimmiten rajoittava tekijä. Ainakaan Tilastokeskuksen mukaan Suomen taloudesta ei ole saatavilla alueellisesti rajoitettua tuotos-panos-dataa. Toisaalta, esimerkiksi Yhdysvalloissa vastaavaa dataa on saatavilla (Haines et al., 2005a). Mikäli päädytään käyttämään alueellista tuotos-panos-mallia laajemman talousalueen sisällä, tulee huomioida tarkasteltavan alueen riippuvuus ulkoisesta taloussystemistä vaihtotaseen kautta. Näin ollen, myös koko yhteiskunnan kattavan mallin tapauksessa tulee oikeastaan huomioida ulkomaankaupan tekijät.

Leontieffin mallin staattinen versio, mihin myös Hallegatten malli pohjautuu, perustuu ajatukseen siitä, että yhtälö (1) pätee kun talous on tasapainossa, eli kysyntä kohtaa tarjonnan jokaisen sektorin ja tuotteen tapauksessa niin välituotteiden kuin myös lopputuotteiden markkinoilla. On kuitenkin selvää, että talouden rakenteellisten tekijöiden muuttuessa kestää jonkin aikaa ennen kuin talous päätyy uuteen tasapainoonsa. Näin ollen sopiva aikajänne tuotos-panos-malleille lienee kuukausien suuruusluokassa. Lisäksi vaikka Hallegatten malli on oikeastaan dynaaminen sen mallintaessa erilaisia sopeutumisprosesseja, taustalla on ajatus siitä, että jokaisella ajanhetkellä, jolla mallin sisäisten muuttujien arvot ratkaistaan, talous on tasapainossa. Tällöin Hallegatten mallin aika-askelen tulisi olla myös kuukausien suuruusluokkaa. Selvää on, että päivä- ja viikkotason muutosten kuvaamiseen tuotos-panos-mallit eivät sovellu. Lisäksi talousjärjestelmän väli- ja lopputuotevarastoilla on luultavasti voimakas merkitys lyhyen aikavälin sopeutumisessa - tuotos-panos-mallit eivät sellaisenaan mallinna varastoja lainkaan.

Periaatteessa tuotos-panos-malleilla voi mallintaa minkäläisen tahansa häiriöskenaarion vaikutuksia. Kuitenkin koska malleissa oletetaan lineaarinen tuotantoteknologia kertoimien a_{ij} kautta, lienee malli tarkimmillaan silloin, kuin häiriöiden aiheuttamat poikkeamat kysynnän ja tarjonnan tasoissa ei-

vät ole suuret. Toisin sanoen, mitä dramaattisemmin häiriö vaikuttaa talouden toimintaan, sen epätodennäköisempää on tuotos-panos-mallien sopivuus. Kuitenkin, tulee muistaa, että ainakin Hallegatten malli mahdollistaa myös sopeutumisprosessien mallintamisen, ja Percoco (2006) näyttää, kuinka tuotantoteknologian muutoksista aiheutuvia vaikutuksia voidaan analysoida tuotos-panos-mallin avulla. Kuitenkin tällöin parametrien arvojen valinta on hankalaa, kun ei voida olettaa havaittua taloudellista rakennetta ja käyttää mitattua tuotos-panos-dataa.

4.1.3 Sisäänmeno- ja ulostulomuuttujat

Hallegatten mallin sisäänmenomuuttujat ja -parametrit ovat kvalitatiivisesti ilmaistuna seuraavat:

- Lopputuotteiden kysynät. Nämä voidaan joko olettaa olevan samat, kuin ennen häiriötilannetta, tai ne voidaan arvioida itse, mikäli kysyntäshokki on aiheellista olettaa. Hallegatte jakaa kysynnän useampaan osaan: paikalliseen loppukysyntään, vaihtotaseeseen ja ”ylimääräisiin” eli rakenteellista suurempiin investointeihin tuotantokapasiteetin palauttamiseksi.
- Tekniset kertoimet, jotka kertovat sen, mitä hyödykkeitä eri sektorit tarvitsevat. Arvoina voidaan käyttää mitattujen tuotos-panos-taulukoiden implikoimia arvoja, ellei toisin vaadita.
- Sektorien maksimituotantokapasiteetit. Lienee riittävää asettaa nämä äärellisiksi vain niille sektoreille, joista muodostuu pullonkaulat, eli esimerkiksi polttoainehuoltosektorille, mikäli sellainen on mallissa erillään muusta taloudellisesta toiminnasta.
- Kuvaus siitä, kuinka pullonkaulahyödykkeet allokoidaan sektoreiden ja loppukysynnän kesken. Päätös prioriteettijärjestyksestä on tutkijan päätettävissä.

- Eri toimijoiden sopeutumista kuvaavat parametrit. Näiden valinta on Hallegatten mukaan hankalaa. Parametreja voidaan kalibroida realisoituneiden tapahtumien perusteella. Tulee tosin muistaa, että parametrit ovat hyvin tapahtumasidonnaisia, jolloin historiallisesta datasta estimointikaan ei välttämättä takaa realistisia tuloksia.

Yhteenvedona tarvittavasta datasta todettakoon, että merkittävin osa on saatavissa useissa tapauksissa tahoilta, jotka keräävät tuotos-panos-dataa. Kuitenkin, useiden parametrien arvojen valitsemiseen ei tämän työn puitteissa luetussa kirjallisuudessa tarjota vakuuttavia keinoja.

Mallin ulostulomuuttujat ovat hyödykkeiden tuotantotasot ja kulutukset sektoreittain. Näiden muuttujien tulkinta on selvä: ne kertovat, kuinka paljon missäkin tuotetaan mitäkin ja kuinka paljon kukin sektori kuluttaa kutakin tuotetta.

4.1.4 Esimerkkitoteutukset

Hallegatte (2008) arvioi mallinsa avulla sitä, kuinka Louisianan osavaltio Yhdysvalloissa reagoi taloudellisesti hirmumyrsky Katrinan aiheuttamaan laajaan pääoman tuhoon. Mallin avulla arvioidaan esimerkiksi myrskyn tuhosta aiheutuneet taloudelliset menetykset verrattuna osavaltion potentiaaliseen tuotantotasoon, sekä useita muita lukuja, kuten tuotantotason muutokset sektoreittain sekä muutokset työllisyydessä. Kun mallin tuloksia verrataan arvioituihin taloustilastoihin, mallin havaitaan sopivan dataan hyvin lukuunottamatta välittömästi myrskyä seuranneita viikkoja. Syyksi tälle epäillään sitä, että välittömästi myrskyn jälkeen talouden rakenne ei ollut ”normaali” johtuen esimerkiksi liikkumisvaikeuksista, teknisistä ongelmista ja muista luonnonkatastrofiin liittyvistä tekijöistä, joita ei voida lukea pääoman tuhoutumisen kategoriaan.

Muut julkaistut implementaatiot, jotka mallintavat tuotantopuolen häiriöiden taloudellisia vaikutuksia tuotos-panos-mallin keinoin, ja jotka löydettiin

osana kirjallisuuskatsausta, ovat seuraavat:

- Hallegatte et al. (2011) hyödyntävät yllä kuvattua Hallegatten mallia selvittäessään merenpinnan nousun taloudellisia seurauksia Kööpenhaminassa. Artikkelissa pyritään tuottamaan malliin nojaten perusteltua riskianalyysia, jonka avulla voidaan miettiä erilaisten ehkäisykeinojen, kuten tulvavallien, rakentamisen taloudellista hyötyä.
- Ranger et al. (2011) käyttävät Hallegatten mallia samalla tavalla kuin yllä, nyt vain Mumbain kaupungin tapauksessa.
- MacKenzie et al. (2012) käyttävät monialueellista tuotos-panos-malli estimoidessaan Japanin vuoden 2011 maanjäristyksen ja tsunamin aiheuttamien materiaalivahinkojen globaaleja talousvaikutuksia. Artikkelin tuloksena osoitetaan, että Japanin sisämarkkinoiden kysyntä tyydytettiin sisäisen tuotantokyvyn merkittävän heikkenemisen jälkeen varastojen ja tuonnin avulla.

4.1.5 Arviointi ja yhteenveto

Projektiryhmän arvio tuotos-panos-malleista on se, että ne vaikuttavat lupaavilta keinoilta tutkia mitä tapahtuu, kun jonkin tai joidenkin hyödykkeiden kysyntä kasvaa ja/tai tarjontakapasiteetti laskee siten, että talouteen muodostuu tuotannollinen pullonkaula. Eri sektorien haavoittuvaisuuksien ohella voitaisiin tutkia myös esimerkiksi sitä, millaiset priorisointijärjestykset sektorien tarpeiden suhteen olisivat tehokkaita taloudellisesti mitattuna. Lisäksi voitaisiin tutkia erilaisten sopeutustoimien vaikutuksia Hallegatten mallin tapaisella dynaamisella mallilla. Kenties tuotos-panos-mallin avulla voitaisiin myös suorittaa kustannus-hyöty-analyyseja siitä, kannattaako esimerkiksi joidenkin sektoreiden haavoittuvutta polttoainelogistiikan suhteen vähentää investoinnein.

Muita mallin hyviä puolia ovat ainakin yhteensopivuus tyypillisten kansantalouden tuotos-panos-taulukoiden kanssa sekä se, että kirjallisuudesta löy-

tyy ainakin yllä kuvatut esimerkkitoteutukset, jotka osoittavat, että mallia voidaan hyödyntää myös tosimaailman päätöksenteossa.

Uskomme kuitenkin, että mallin toteuttaminen tilaajan tarpeisiin sopivalla tavalla vaatisi oman, operaatiotutkimuksen alan ammattilaisten suorittaman tutkimusprojektin. Vaikka esimerkkitoteutuksia on olemassa ja Tilastokeskus julkaisee tuotos-panos-taulukkoita Suomen taloudesta, on epäselvää kuinka haastavaa datan yhteensovittaminen malliin sekä mallin rakenteen hienosäätöäminen tilaajan tarpeisiin sopivaksi olisivat. On hyvin luultavaa, että mallia ei voitaisi käyttää ainakaan ”plug-and-play”-tyylisesti - tämän todistaa jo se, että yllä mainituissa esimerkkitoteutuksissa on kaikissa merkittävästi hienosäätöä, jonka tarkoituksena on huolehtia mallin sopivuudesta kyseessä olevaan tutkimusongelmaan nähden.

Lisäksi, koska tuotos-panos-mallien taustalla on paljon yksinkertaistavia oletuksia (esimerkiksi tuotantoteknologioiden lineaarisuus ja aikariippumattomuus) ja ainakin osa parametreista joudutaan arvioimaan itse tai asiantuntija-arvioiden perusteella, tulee projektiryhmän mielestä mallin tulokset ottaa suuntaa-antavina. Voi olla myös hyödyllistä suorittaa herkkyysanalyysia ainakin niiden parametrien suhteen, joiden arvoja ei voida lukea suoraan tuotos-panos-taulukkoista tai muista luotettavista tilastoista.

Lopulta, tulee muistaa, että tuotos-panos-mallit keskittyvät vain taloudelliseen tuotantoon - käytännön toteutuksissa hyödyn mittana ovat siis eurot Suomen tapauksessa. Luultavasti mietittäessä polttoainelogististen resursien jakamista häiriötilanteissa eivät taloudelliset kriteerit ole ainoat, joiden perusteella tehdään päätöksiä. Tämä rajoitus on hyvä pitää mielessä, mikäli aikoo hyödyntää tuotos-panos-malleja päätöksenteossa.

4.2 Simulointi

4.2.1 Mitä on simulointi?

Simulointi ei ole yksiselitteisesti määritelty käsite. Yleisesti ottaen simuloinnilla tarkoitetaan jonkin prosessin imitointia toisen prosessin avulla. Simulaation taustalla on jokin matemaattinen malli, jolle ei voida tai haluta käyttää analyttistä ratkaisua⁴ (Hartmann, 1996).

Tähän työhön liittyvät simulaatiot pohjautuvat dynaamisiin malleihin. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että simulaation tila ei ole vakio, vaan muuttuu ajan kuluessa. Usein tämä tilan muutos riippuu myös tilasta itsestään.

Simulaatiomallit voidaan jakaa sekä ajan että tilojen suhteen diskreetteihin ja jatkuviin malleihin: diskreeteissä malleissa muuttujia⁵ käsitellään vain rajallisella tarkkuudella kun jatkuvissa malleissa tällaista rajoitetta ei ole. Esimerkiksi sekä ajan että tilan suhteen diskreetti malli saattaisi kuvata ajan kulkua päivä kerrallaan ja öljyä sadan litran yksiköissä. Vastaavan jatkuvan mallin toteuttaminen olisi laskennallisesti haastavampaa, jos edes mahdollista. Etuna puolestaan olisi mielivaltaisen pienten⁶ ajanjaksojen ja öljymäärien tarkastelu.

Simulointi on erittäin monipuolinen ja havainnollinen tapa prosessien ymmärtämisen ja päätöksenteon tueksi. Simulaatiomalleja hyödyntäessä tulee pitää mielessä malliin liittyvät oletukset ja rajoitukset—usein mallin simulointi on helppoa, mutta todellisuus poikkeaa simulointituloksista, koska jokin prosessin olennainen osa jätettiin mallintamatta.

Simulaatiomallit eivät yksinään riitä päätöksentekoon, sillä on todella vaikeaa osoittaa, että malli on toteutettu oikein ja riittävällä tarkkuudella. Kui-

⁴Analyttinen ratkaisu voidaan ilmaista tunnettujen funktioiden ja vakioiden avulla matemaattisena lauseena. Simulaatioiden tuloksena saadaan yksittäisiä lukuja. Näitä kutsutaan numeerisiksi ratkaisuisiksi ja niiden tarkkuus riippuu käytetystä menetelmästä.

⁵Aikaa ja tiloja

⁶Tietokoneen laskentatarkkuuden rajoissa

tenkin karkea mallintaminen on nopeaa ja suoraviivaista, joten simulointien tekemättä jättämiselle on vaikeaa löytää perusteita, mikäli tutkittavassa prosessissa on piirteitä, joista halutaan syvempi ymmärrys.

4.2.2 Yleinen kuvaus

Öljynjakeluketjun mallintamisella tarkoitetaan käytännössä jonkin olemassa olevan tai kuvitteellisen logistisen kokonaisuuden kuvaamista täsmällisellä tavalla. Esimerkiksi öljyvarastoista, öljynkuljetusyhdistelmistä ja öljyn jakelupisteistä koostuva järjestelmä voidaan mallintaa matemaattisesti ja tämän jälkeen hyödyntää simulaatioissa.

Joitain simulaatiomallin tuomia mahdollisuuksia ovat

1. syventää ymmärrystä jakeluprosessista
2. ennustaa prosessin käyttäytymistä skenaarioissa, jotka ovat kalliita tai mahdottomia testata käytännössä

Syvällinen ymmärtäminen on olennaista, jotta systeemiin liittyvä päätöksenteko on vakaalla teoreettisella pohjalla. Kalliiden ja mahdottomien skenaarioiden ennustaminen puolestaan mahdollistaa vastaukset askarruttaviin kysymyksiin simulaation kehitystyön hinnalla—esimerkiksi lisäkaluston hankinnan järjestyttä voidaan etukäteen perustella simulaatiotuloksilla. Myös järjestelmän toimintakykyä erilaisissa poikkeustilanteissa voidaan testata.

4.2.3 Mallin rajaukset

Jakeluketjun simulointia voidaan teoriassa suorittaa millä tahansa tarkkuudella, laajuudella, aikavälillä ja skenaarioilla. Käytännössä laskentateho rajoittaa tarkastelua siten, että malli ei voi samaan aikaan olla erittäin tarkka, laaja ja pitkälle aikavälille rajattu. Mallin rakennusvaiheessa joudutaan valitsemaan rajaukset sen perusteella, mihin kysymyksiin mallilla halutaan vastata ja millaisia resursseja mallin tekemiseen ja simulointiin on käytössä.

4.2.4 Sisäänmeno- ja ulostulomuuttajat

Simulaatiomalleihin ei varsinaisesti liity yleisiä sisäänmeno- tai ulostulomuuttajia. Mallin rakennusvaiheessa tehdään valintoja esimerkiksi simulointimallin mallinnettavista ilmiöistä, aika-askelten pituudesta sekä käytettävien menetelmien tarkkuudesta. Rakentaminen vaatii ymmärryksen kuvattavasta prosessista, ja tätä ymmärrystä voikin pitää mallin rakentamisvaiheen sisäänmenomuuttujana. Tällöin ulostulona saadaan käyttökelpoinen malli.

Kun mallin rakenne on valittu, liittyy siihen konkreettisia sisääntulomuuttajia. Esimerkiksi kappaleessa 4.2.2 ehdotettu öljyvarastoista, kuljetusyhdistelmistä ja jakelupisteistä koostuva malli voisi, rakenteestaan riippuen, ottaa sisääntulokseen listan varastoiden ja jakelupisteiden paikoista, sekä käytössä olevien yhdistelmien määrän. Paikkojen lisäksi voidaan tietoihin sisällyttää esimerkiksi varastojen kokoja, yhdistelmien kuljetuskapasiteetteja ja nopeuksia tai muita simulaation kulkuun olennaisesti vaikuttavia piirteitä, mikäli malli on rakennettu näitä piirteitä silmällä pitäen.

Toinen olennainen simulaatioon liittyvä sisääntulotyyppi on ns. simulaation ulkopuoliset tapahtumat. Edellä esitellyssä mallissa näitä voisivat olla erilaiset tilaus- ja ostotapahtumat, joiden määräytymisperusteita simulaatiomallissa ei ole mallinnettu. Myös poikkeustilanteet, kuten tieverkoston vahingoittuminen tai erilaiset onnettomuudet kuljetuksiin liittyen voidaan antaa sopivaan malliin sisääntuloskenaariona. Mallin rakenteesta riippuen skenaarion tapahtumat voidaan antaa yksittäisten tapahtumien listana tai jonain todennäköisyysjakaumana, jonka perusteella tapahtumat luodaan satunnaisesti simulaation aikana.

Esimerkkimallilla ei ole mitään yksittäistä ulostuloa, vaan simulaation läpikäymien tilojen sarja toimii ulostulona.

4.2.5 Esimerkkitoteutus

Öljynkuljetusverkkoon liittyen ei löytynyt kirjallisuudesta valmiita simulaatiomalleja, mutta yleisiä logistisia malleja on tutkittu simulaation keinoin paljonkin. Esimerkiksi Van Der Zee ja Van Der Vorst (2005) muodostavat autonvalmistuksen jakeluketjusta mallin, joka yhdistää jakeluketjun jatkuvia ja diskreettejä piirteitä samaan malliin.

Toisessa artikkelissa Carvalho et al. tutkivat simulaatiokeinoja resilientin⁷ jakeluketjun suunnittelemiseksi (Carvalho et al., 2012). Vaikka esitetyn ketjun rakenne varmasti poikkeaa öljynkuljetuksesta, vastaavia simulaatiomenetelmiä voidaan hyödyntää öljynkuljetusketjun resilienssiä arvioidessa ja kehittäessä.

4.2.6 Arviointi ja yhteenveto

Jakeluketjun tapauksessa nykyinen öljynkuljetuslogistiikka on melko yksinkertaista mallintaa: haastavin osuus on alan toimijoiden sisäisen logiikan⁸ mallintaminen, mutta hyödyllisiä tuloksia varmasti saadaan tekemällä perusteltuja oletuksia tästä logiikasta.

Valmiin mallin avulla voidaan tutkia öljynjakelun toimimista niin normaalioloissa kuin poikkeustilanteessakin. Myös erilaisen kaluston, jakelulogiikan, jakelupisteiden sijoituksen tai muun vastaavan muutoksen vaikutusta voidaan analysoida.

Mallinrakennusprosessi on myös itsessään ymmärrystä syventävä, sillä jakeluverkon kaikkien osien toiminta on ymmärrettävä, jotta malli voidaan muodostaa.

⁷Jakeluketjun resilienssillä tarkoitetaan ketjun kykyä sekä pienentää häiriötapauksien todennäköisyyttä ja seurauksia että palautua häiriöistä nopeasti normaalitilaan (Falasca et al., 2008)

⁸esim. Millä perusteella tilaukset priorisoidaan? Millainen reittioptimointialgoritmi on käytössä?

4.3 Huutokauppamekanismit

4.3.1 Yleinen kuvaus

Öljynkuljetusyhdistelmien pakkokäyttöönotto on valmiustilalain nojalla mahdollinen toimenpide. Sen toteuttaminen reilusti ja tehokkaasti on kuitenkin osoittautunut ongelmalliseksi. Mikäli pakkokäyttöönottoja joudutaan tekemään, on yksi keino tehokkaimman ratkaisun löytämiseksi järjestää huutokauppatyylinen tilaisuus, jossa eri toimijat määrittävät itsenäisesti öljynkuljetusyhdistelmien arvon itselleen. Näin hyödynnetään logistiikkatoimijoiden omaa osaamista, ja päästään hyvin suunnitellun mekanismin avulla reiluun ratkaisuun. (Ausubel ja Milgrom, 2006)

Naivi esimerkkimekanismi tilanteessa, jossa puolustusvoimat joutuu ottamaan käyttöön yhden kuljetusyhdistelmän, voisi toimia seuraavasti: Vaihtoehtoisia logistiikkatoimijoita, joilta yhdistelmä otettaisiin, on kaksi, toimijat A ja B . A ja B ilmoittavat käyttöönotosta itselleen koituvan taloudellisen haitan suuruudet S_A ja S_B , joista S_A on suurempi. Puolustusvoimat ottaa yhdistelmän käyttöön toimijalta B , ja toimija A maksaa B :lle summan S_B . Näin minimoidaan siviiliyhteiskunnalle koituva vahinko, toimijat A ja B saavat joko itse määrittelemänsä korvauksen pakkolunastuksesta tai pakkolunastusta mieluisamman vaihtoehdon ja puolustusvoimat saa kuljetusyhdistelmän.

4.3.2 Mallin rajaukset

Tässä kappaleessa kuvatut huutokaupat sopivat pakkokäyttöönottilanteisiin. Huutokauppa toteutettaisiin joko etukäteen tai pakkokäyttöönoton tullessa ajankohtaiseksi, mutta joka tapauksessa selkeästi rajattuna tapahtumana. Huutokaupan laajuuden olisi toimijoiden syrjimisestä välttämiseksi oltava mahdollisimman laaja.

4.3.3 Sisäänmeno- ja ulostulomuuttajat

Mekanismin suunnittelija tarvitsee kattavan kuvan vallitsevista markkinaolosuhteista, jotta yksikään toimija ei pääse väärinkäyttämään esim. johtavaa markkina-asemaansa huutokaupan kuluessa. Ulostulona on huutokauppamekanismi, jonka avulla pakkokäyttöönnotto saadaan tehtyä mahdollisimman reilulla tavalla.

4.3.4 Esimerkkitoteutus

Mishra ja Veeramani kuvaavat artikkelissaan käänteisen usean myyntiartikkelin ja usean myyjän Vickrey–Dutch hankintahuutokaupan (Mishra ja Veeramani, 2007). Tämä huutokauppa on todistettu teoriassa strategiavapaaksi, eli osallistujien paras strategia on huutaa todellisten intressiensä mukaisesti. Tilanne poikkeaa pakkokäyttöönotoista siinä, että artikkelissa kuvatussa huutokaupassa ostaja maksaa myyjälle, kun pakkokäyttöönotoissa tällaista kompensointia ei suoriteta.

4.3.5 Arviointi ja yhteenveto

Mallin vahvuutena on, että hyvin suunnitellulla mekanismilla saadaan pakkokäyttöönnotto tehtyä niin tehokkaasti kuin mahdollista. Heikkoutena on mekanismin suunnittelun vaikeus: Klemperer huomauttaa Euroopan taajuushuutokauppojen myyntihintojen vaihdelleen 20 eurosta 650 euroon per capita (Klemperer, 2002).

Myös pakkokäyttöönottojen tarpeellisuus on kyseenalaista nykytilassa, jossa ensisijaisena suunnitelmana on hyödyntää ja ylläpitää siviilipuolen kuljetusverkon toimintaa. Mikäli tilanne kuitenkin vaatii pakkokäyttöönottoja, on tässä kappaleessa kuvatun tyyppinen käänteinen huutokauppa varteenotettava vaihtoehto kohdetta valittaessa.

4.4 Yleistä tietoa optimoinnista

Matemaattisten optimointimenetelmien tavoitteena on löytää tietylle ongelmalle paras mahdollinen ratkaisu. Matemaattisessa optimointimallissa ratkaistava ongelma kuvataan siten että ongelman tietyt tärkeät osat ovat mukana mallissa. Optimointimalli koostuu päätösmuuttujista, rajoitusehdoista ja kohdefunktiosta (Levy, 2009). Päätösmuuttujat kuvaavat ongelman sitä osaa, johon ratkaisun käyttöönottaja kykenee vaikuttamaan erilaisten ratkaisujen aikaansaamiseksi. Jos tehtävänä on esimerkiksi päättää kuinka paljon öljyä tilataan varastoon, päätösmuuttuja optimointimallissa on tilattavan öljyn määrä. Päätösmuuttuja voi kuvata myös vaikka säiliöauton siirtoa paikasta toiseen. Optimointimallin rajoitusehdot kuvaavat rajoituksia päätösmuuttujiin. Esimerkiksi varaston koko voi rajoittaa tilattavan öljyn määrää. Optimointimallin kohdefunktio antaa lukuarvon kullekin ratkaisulle ja kertoo minkä kriteerin suhteen pyritään löytämään optimaalinen ratkaisu. Kohdefunktiot kuvaavat usein kustannuksia, kuluvaa aikaa tai käytettyjä resursseja.

Optimointimalleja on suuri määrä erilaisia ja niillä kyetään etsimään ratkaisuja huomattavaan määrään oikean elämän ongelmia. Optimointimallien käyttökelpoisuutta rajoittaa mallintamisen haastavuus. Monet mahdollisista malleista ovat liian hitaita ratkaista ja tehokkaan mallin löytäminen on vaikeaa. Optimointimalli täytyy usein ratkaista numeerisesti käyttäen optimointimallin ratkaisemiseen kehitettyjä algoritmeja. Monien algoritmien ajaminen vie huomattavasti aikaa ongelman koon kasvaessa. Oikean elämän ongelmista muodostetut optimointimallit ovat usein niin suuria, ettei niitä kyetä järkevässä ajassa ratkaisemaan. Kuitenkin näihinkin ongelmiin kyetään löytämään lähes optimaalisia ratkaisuja niin kutsuttujen heuristiikkojen avulla. Heuristiikat ovat menetelmiä jotka etsivät ratkaisun joka ei välttämättä ole optimaalinen mutta on riittävän hyvä. Usein optimointimallia ei kyetä tekemään kovin suurista kokonaisuuksista kuten koko Suomen polttoainelogistiikkaverkosta optimointimallin ratkaisun etsimiseen kuluvan ajan takia. Ongelman

koko pitää rajata siten että ratkaisu löydetään kohtuullisessa ajassa.

Optimointimallien hyvä puoli on se, että ne antavat suoraan toiminta- tai strategiaehdotuksia. Optimointimallin ratkaisu on paras mahdollinen annetulla kriteerillä. Jos optimointimalli on rakennettu oikein kuvaamaan käsillä olevaa ongelmaa, voidaan olla varmoja että parempaa ratkaisua ei ole saatavilla.

Optimointimallien heikkouksia on ongelman koon kanssa kasvava ratkaisuaika, joka saattaa kasvaa niin suureksi ettei ongelmaa kyetä järkevästi ratkaisemaan. Lisäksi optimointimallin luominen voi olla hankalaa jos rajoitusehtojen ja kohdefunktion muodostamiseen ei ole tarpeeksi tietoa saatavilla. Myös kohdefunktion valinta voi olla hankalaa varsinkin tilanteessa jossa tahdotaan optimoida useita kriteerejä samaan aikaan. Jos esimerkiksi halutaan minimoida kustannuksia sekä aikaa, täytyy tehdä valintoja siitä kuinka arvostetaan vähentynyttä aikaa verrattuna kustannuksien lisäykseen. Erilaisilla painotuksilla voidaan saada erilaisia ratkaisuja. Lisäksi optimointimalli on luotava aina jonkun toimijan näkökulmasta. Eri tahoilla voi olla erilaiset intressit siitä minkä kriteerin suhteen optimointi pitäisi tehdä.

Työssä esitellään kaksi optimointimallia joista voi olla hyötyä ongelmakentän ongelmien ratkaisemisessa. Ensimmäinen mallityyppi on niin kutsuttu dynaaminen reititysongelma (dynamic vehicle routing problem, DVRP), jolla optimoidaan kuljetuskaluston reittejä. Tämän tyyppisiä optimointiongelmia on tutkittu paljon viime vuosien aikana logistiikkaketjujen yhä lisääntyvän tärkeyden takia. Kuljetuskaluston reitin optimointi on varsinkin kuljetusyhtiöiden kohtaama ongelma. DVRP:tä voidaankin siis käyttää vähentyneestä säiliöautojen määrästä aiheutuvien haittojen vähentämiseen optimoimalla jäljellä olevan kaluston käyttöä. Tätä työkalua voidaankin esimerkiksi tarjota logistiikkayhtiöille huoltovarmuuden parantamiseksi kaluston käytön tehostamisen kautta.

Toinen mallityyppi on suurimman peiton ongelma joka käsittelee varastojen sijoittamista. Koska vakavissa häiriötilanteissa valmiuslain ollessa voimassa

kaikkia öljynjakelupisteitä ei voida pitää auki, täytyy tietää mitkä jakelupisteet suljettaisiin tilanteen sitä vaatiessa. Jakelupisteverkon karsinnan on aiheutettava mahdollisimman vähän häiriöitä öljyn jakeluun. Varastojen sijoittamisen optimointimallit auttavat öljynjakelupisteiden verkon suunnittelussa siinä tapauksessa, että kaikkia jakelupisteitä ei pidetä auki.

4.5 Dynaaminen reititysongelma

4.5.1 Yleinen kuvaus

Dynaamista reititysongelmaa voidaan käyttää säiliörekkojen jakelureittien suunnitteluun ja siten öljynkuljetuksen tehostamiseen. Montemanni et al. (2005) kuvaavat dynaamisen reititysongelman (DVRP) seuraavasti. Staattisessa reititysongelmassa (VRP) n määrä asiakkaita täytyy palvella yhdestä keskusvarastosta käsin. Jokainen asiakas i tilaa määrän q_i vietävää tuotetta. Kuljetusautoja on käytössä v kappaletta ja tietty auto a kykenee kuljettamaan määrän Q_a tuotetta. Jokaisen asiakkaan palvelemiseen kuluu jokin tietty aika s_i . VRP:n ratkaisuna saadaan kuljetusautojen reitit asiakkaiden palvelemiseen. Matemaattisesti tämä ongelma voidaan kuvata painotettuna verkkona $G = (V, A)$, jossa $V = 0, 1, 2, \dots, n$ on joukko solmuja jotka kuvaavat keskusvarastoa (0) ja asiakkaita (1, ..., n), ja $A = (i, j) | i, j \in V$ on joukko kaaria joista kullekin on määrätty vähittäiskuluaika tt_{ij} . Asiakkaan i tuotetta tilaama määrä q_i liittyy asiakasta vastaavaan solmuun i . Kuljetusautojen kapasiteetit Q_1, \dots, Q_v liittyy keskusvarastoon eli solmuun 0. Tavoitteena on löytää käypä joukko reittejä siten että kokonaismatkustusaika minimoituu. Reitti on käypä silloin kun kussakin solmussa käydään tasan kerran, ja jokainen reitti alkaa ja loppuu keskusvarastolle, eikä tietylle reitille laitettujen kysyntöjen q_i summa ylitä kuljetusauton a kapasiteettia Q_a . DVRP on hyvin samankaltainen ongelma kuin VRP. Suurin ero näiden ongelmien välillä on se, että DVRP:ssä uusia tilauksia saapuu päivän aikana samalla kun autot ovat jo liikkeessä. DVRP voidaan mallintaa jonona staattisia VRP:itä sitä mukaa

kun uusia tilauksia saapuu päivän mittaan. Yleiskatsauksen viimeaikaiseen tutkimukseen DVRP:stä tarjoaa Larsen et al. (2008). DVRP:n ratkaisemiseen on ehdotettu useita ratkaisumenetelmiä joita esittelevät muun muassa Montemanni et al. (2005), Feo ja Resende (1995) sekä Crainic ja Laporte (1997).

4.5.2 Mallin rajaukset

Mallissa öljylogistiikkaverkosto kuvataan kysyntäsolmujen tarkkuudella. Kysyntäsolmu voi tarkoittaa kaupunkia, kylää tai vaikka yksittäistä huoltoasemaa. Mallissa kuvataan jokainen verkossa liikkuva säiliöauto itsenään. DVRP:n aikahorisontti on lyhyt, korkeintaan muutamia päiviä, mutta yleensä vain yksi päivä. Montemanni et al. (2005) käyttävät ratkaisualgoritmin testaamiseen esimerkkiongelmia, joiden koko vaihtelee 50:stä 199:ään asiakkaaseen. Koko Suomen polttoainelogistiikkaverkkoa ei siis voida optimoida käyttäen DVRP:tä ilman että kysyntäsolmut kuvataan suurempina yksiköinä, kuten kaupunkeina. Luultavammin DVRP:n soveltamisessa keskitytään jonkin tietyn alueen jakeluverkkoon. Mallilla ei kuvata mitään yksittäistä häiriöskenaariota, vaan se on yleinen työkalu logistiikan optimointiin.

4.5.3 Mallin sisäänmeno ja ulostulo

DVRP:n soveltamiseksi tarvittavat tiedot ovat säiliöautojen kapasiteetti, säiliöautojen määrä, asiakkaiden määrä, asiakkaiden väliset etäisyydet ja keskusvaraston etäisyys asiakkaista, sekä tilausmäärät. Aikaavievin osa tarvittavien tietojen hankinnassa on luultavasti asiakkaiden välisten etäisyyksien selvittäminen. Koska ongelmaa varten on saatava selville jokaisen asiakkaan etäisyys kaikista muista asiakkaista, kasvaa selvittettävien etäisyyksien määrä nopeasti asiakkaiden määrän kasvaessa. Myös tilausmäärien ennakoiminen historiatietojen pohjalta saattaa osoittautua haasteelliseksi. Muut tarvittavat tiedot ovat luultavasti helposti saatavilla logistiikkayrityksiltä. Mallin

ulostulona saadaan jokaisen mallinnettavan säiliöauton reitti suunnitteluhorisontille. Reitti kuvataan siirtyminä yhdestä kysyntäsolmusta toiseen.

4.5.4 Esimerkkitapaukset

Montemanni et al. (2005) esittelevät ratkaisutekniikkaansa käytännön esimerkin avulla. Esimerkissä DVRP:tä käytetään Luganon kaupungin polttoaineenjako-
verkon kuljetusten optimointiin. Esimerkissä on yksi keskusjakelupiste polttoaineelle, josta polttoainetta viedään 50 asiakkaalle. Esimerkin päätarkoitus on esitellä tutkimuksen kohteena olevan ratkaisutekniikan soveltuvuutta käytännön ongelmiin, ja tutkimuksessa todetaan tekniikan soveltuvan siihen hyvin. Brown ja Graves (1981) esittelevät säiliöautojen reititysjärjestelmän, joka hyödyntää staattista VRP:tä. Tämä järjestelmä on ollut käytössä Chevronilla Yhdysvalloissa.

4.5.5 Arviointi ja yhteenveto

DVRP soveltuu käytettäväksi logistiikkayritysten kohtaaman jakeluongelman ratkaisemiseen. Mallin avulla kyetään tehostamaan polttoaineenjake-
lua automatisoimalla säiliöautojen jakelureittien suunnittelu. Mallin hyvä puoli on se, että se antaa suoraan käytettävissä olevia tuloksia. Vaikeuksia mallin käyttöönotossa voi olla mallin toteuttaminen logistiikkayritysten tietojärjestelmiin. Malli vaatii tarkan maantieteellisen rajauksen varsinkin kun malli pitää voida ratkaista lyhyessä ajassa lyhyen suunnitteluhorisontin takia. Lisäksi kysyntäsolmujen välisten etäisyyksien selvittäminen voi olla työlästä.

4.6 Suurimman peiton ongelma

4.6.1 Yleinen kuvaus

Sijoitusongelmia voidaan käyttää toimipisteiden, kuten varastojen tai jakelupisteiden, sijoittamispaikan päättämiseen. Toimipisteen sijoittamisessa täytyy ottaa huomioon muun muassa kuinka toimipiste palvelisi mahdollisimman monia asiakkaita. Sijoittamisongelmia on useita erilaisia, joista tässä esitellään suurimman peiton ongelma (maximal covering location problem, MCLP). Muita sijoittamisongelmia on kuvattu artikkelissa (Crainic ja Laporte, 1997). Suurimman peiton ongelmassa etsitään suurinta määrää asiakkaita, joita voidaan palvella tietyn palveluetaisyyden tai palveluajan sisällä, kun toimipisteiden määrä on rajattu (Church ja Velle, 1974).

Matemaattisesti ongelma kuvataan painotettuna verkkona, jossa on I kappaletta kysyntäsolmuja ja J kappaletta mahdollisten toimipisteiden solmuja. Jokaiseen kysyntäsolmuun i liittyy asiakkaiden määrä a_i , joita palvellaan kun kysyntäsolmu on peitetty. Solmujen i ja j välinen lyhin etäisyys on d_{ij} . S_j on suurin toimipisteen j ja kysyntäsolmun välinen etäisyys, jolloin kysyntäsolmun katsotaan olevan vielä peitetty. Toimipisteitä sijoitetaan verkkoon p kappaletta. Ongelman ratkaisuna saadaan maksimaalinen määrä asiakkaita, jotka voidaan palvella p :llä toimipisteellä, sekä näiden toimipisteiden paikat. Church ja Velle (1974) tarjoavat tarkemman matemaattisen formulaation ongelmasta sekä ratkaisutekniikoita. Galvão ja ReVelle (1996) esittelevät myös erään heuristiikan MCLP:n ratkaisuun. ReVelle et al. (2008) ratkaisevat suuria MCLP ongelmia erään heuristiikan avulla nykyisenkaltaisella tietokoneella. Ongelmissa oli 900 solmua ja toimipisteitä sijoitettiin 10-20. Ratkaisuaika suurimmassa ongelmassa oli hieman alle puolitoista tuntia. MCLP:tä kyetään siis käyttämään suurienkin sijoitusongelmien ratkaisemiseen.

4.6.2 Mallin rajaukset

Mallissa maantieteellinen alue kuvataan toimipiste- ja kysyntäsolmujen verkolla. Solmujen koko voi vaihdella käyttötarkoituksen mukaan yhdestä kotitaloudesta kaupunkiin ja kuntaan. Suomen tasolla järkevä solmun koko vaihtelee luultavasti kaupungin ja kunnan välillä. Kysyntäsolmujen kokoa voidaan kuvata esimerkiksi asiakkaiden määrällä tai öljyn kysynnän suuruudella. Mallissa ei ole aikaulottuvuutta vaan se tuottaa yhden päätöksen siitä mihin toimipisteet sijoitetaan. Malli ei myöskään kuvaa mitään tiettyä häiriöskenaariota, vaan sillä voidaan ennakkoon tuottaa päätössuositus johonkin häiriötilanteeseen.

4.6.3 Mallin sisäänmeno ja ulostulo

MCLP:n soveltamiseksi tarvitaan tiedot kysyntäsolmujen ja mahdollisten toimipisteiden sijoituspaikkojen välisistä etäisyyksistä, asiakkaiden määrät kussakin kysyntäsolmussa ja suurin etäisyys toimipisteestä, jolla kysyntäsolmu on vielä peitetty. Lisäksi malli tarvitsee tiedon siitä kuinka monta toimipistettä sijoitetaan. Mallista saadaan ulostulona solmut, joihin toimipisteet sijoitetaan. Nämä solmut kuvaavat toimipisteiden sijainteja.

4.6.4 Esimerkitapaukset

MCLP:tä on käytetty monissa käytännön elämän hankkeissa. Yksi esimerkki on (Adenso-Diaz ja Rodriguez, 1997), jossa MCLP mallia käytetään ambulanssitukikohtien sijoittamiseen maaseudulla. Tutkimuksessa sijoitettiin ambulanssitukikohtia Leónin provinssiin Espanjaan. Leónin provinssi on kooltaan 15500 km² ja siellä asuu 530646 ihmistä 213:ta maakunnassa. Tutkimuksessa maakunta on pienin käytetty maantieteellinen yksikkö. Provinssi on erityisen mielenkiintoinen sen vaihtelevan maaston takia. Provinssin pohjoinen osa on hyvin vuoristoista ja koostuu pienistä kylistä, joihin kulkee

vaikeakulkuisia teitä, jotka hidastavat kyliin pääsyä. Provinssin eteläinen osa taas on tasaista ja siellä on suoria nopeakulkuisia teitä. Provinssin asukkaat ovat myös hajallaan provinssin sisällä. Tavoitteena on kattaa mahdollisimman monta asukasta siten, että ambulanssi pääsee heidän luokseen 15, 25 tai 35 minuutissa. Ongelmassa sijoitettavien tukikohtien määrä vaihteli 1 ja 69 välillä. Jo 16 ambulanssitukikohdan kohdalla ambulanssi ehtii alle 25 minuutissa 95.85% asukkaista luokse. Kun sijoitettavia tukikohtia on 25, ambulanssi pääsee 15 minuutissa 85.2% ja alle 25 minuutissa 99.48% asukkaista luokse. Kun tukikohtia sijoitettiin 69 päästään kaikkien asukkaiden luokse alle 15 minuutissa.

4.6.5 Arviointi ja yhteenveto

Malli soveltuu käytettäväksi tilanteisiin, joissa päätetään jonkin toimipisteen, kuten öljynjakelupisteen sijainnista. Mallilla voidaan esimerkiksi arvioida mitkä öljynjakelupisteet kannattaa pitää auki, jos joitakin täytyy sulkea. Öljynjakeluverkoston on toimittava mahdollisimman hyvin vaikka koko olemassa oleva verkko ei olisikaan käytössä, ja MCLP voi auttaa tämän verkon suunnittelussa. Hyviä puolia MCLP:ssä on sen helppokäyttöisyys. Mallin tarvitsema vähäinen määrä dataa lienee kohtuullisen helposti saatavissa. Mallinnettavan alueen kasvaessa kasvaessa datan kerääminen voi olla hyvinkin aikaavievää, sillä jokaisen kysyntäsolmun ja mahdollisen toimipisteen sijoituspaikan välinen etäisyys on selvitettävä. Suurimmat ongelmat tietojen keräämisessä tulee kysyntäsolmujen päättämisestä. Kysyntäsolmuista päätettäessä on pohdittava sitä, kuinka suuria alueita yhdistetään tiettyyn solmuun. Jos jokainen talo päätetään ottaa yhdeksi kysyntäsolmuksi, niin tietoa on kerättävä paljon. Toisaalta jos harvaan asutuilla alueilla otetaan suuri määrä talouksia mukaan yhteen kysyntäsolmuun, niin etäisyyserot yhden kysyntäsolmun sisällä ovat suuret, jolloin malli ei välttämättä enää kuvaa tilannetta tarkoituksenmukaisesti. Mallin ulostulona saadut toimipisteiden paikat maksimoivat täytetyn kysynnän, kun toimipisteiden palvelusetäisyydet on mää-

ritelty ja kysyntä kuvataan asiakkaiden määränä, kulutettuna resurssina tai vastaavana.

5 Mallien käyttöä tukevat metodit

Projektin kuluessa ryhmä havaitsi, että tilaajalla voisi olla käyttöä kahdelle lähestymistavalle mallien käytön tukena: herkkyysanalyysille ja asiantuntija-arvioiden elisitoinnille. Syynä on se, että useat tutkituista mallista vaativat sisäänmenomuuttujina parametreja, joita on vaikea arvioida esimerkiksi havaitusta datasta objektiivisin ja luotettavin keinoin. Tämän vuoksi voidaan sanoa, että mallien ulostulomuuttujat ovat oikeastaan tutkijan estimaatteja siitä, mikä todellinen ulostuloarvo olisi, jos sisäänmenomuuttujat voitaisiin arvioida mielivaltaisella tarkkuudella. Koemme, että herkkyysanalyysi voisi olla perusteltu ja uskottava tapa kvantifioida tätä epävarmuutta ulostulomuuttujien arvoissa. Lisäksi koska tarkastellut mallit tarvitsisivat lähes säännönmukaisesti sisäänmenomuuttujien arvoja asiantuntija-arvioiden muodossa, koemme järkeväksi esittää lyhyen katsauksen metodiikkaan, jonka avulla asiantuntija-arvioiden elisointi voidaan suorittaa perusteltavalla ja järjestelmällisellä tavalla. Seuraavassa syvennymme sekä herkkyysanalyysiin että asiantuntija-arvioiden elisointiin tarkoituksena tarjota tilaajalle karkea ymmärrys aihepiireistä sekä johtolankoja jatkotarkasteluihin.

5.1 Herkkyysanalyysi

Saltelli et al. (2008) määrittelevät herkkyysanalyysin seuraavasti⁹: herkkyysanalyysi tutkii sitä, kuinka mallin ulostulon epävarmuus voidaan jakaa mallin sisäänmenoihin liittyvien epävarmuuksien kesken. Huomautettakoon, että määritelmän perusteella mallin sisäänmenojen epävarmuuden muuntaminen ulostulon epävarmuudeksi sisältyy herkkyysanalyysiin. Tässä työssä rajoi-

⁹Kirjoittajien oma suomennos.

tutaan edellä mainittuun jälkimmäiseen, suppeampaan määritelmään, koska työssä kuvattujen mallien käytössä ensisijaisen kiinnostavaa lienee tietää, kuinka suuri epävarmuus tuloksiin liittyy.

Jos tilastollinen otos sisäänmenoista on saatavilla, voidaan mallin ulostulon epävarmuutta tutkia esimerkiksi simuloimalla, jolloin kiinnostuksen kohteena on mallin ulostulon stokastinen jakauma, jonka empiiriseen versioon päästään käsiksi simuloimalla sisäänmenojen jakaumasta arvoja, jolla itse mallia ajetaan (Moffat, 1988). Tässä tilanteessa voidaan käyttää joko parametrisia tai ei-parametrisia keinoja.

Parametrisilla keinoilla tarkoitetaan sitä, että sisäänmenojen jakaumalle valitaan rakenne etukäteen, jonka jälkeen jakauman määrittävien parametrien arvot estimoidaan otoksesta. Näin saatavaa parametrisoitua jakaumaa voidaan käyttää hyödyksi simuloimalla siitä mallin ulostuloarvoja. Jakauman muodon ja rakenteen määrittämisessä voidaan käyttää useita keinoja, kuten tarkastella empiirisen jakauman muotoa tai hyödyntää tutkijan etukäteisymmärrystä sisäänmenomuuttujista (Kurowicka ja Cooke, 2006). Ei-parametrinen menetelmä on simuloida sisäänmenomuuttujien arvoja suoraan empiirisestä jakaumasta käyttäen bootstrap-menetelmää (Asmussen ja Glynn, 2007, kappale 3). Kummankin menetelmän takana on vankka tilastollinen teoria sisältäen esimerkiksi hyödyllisiä konvergenssilauseita¹⁰.

Mikäli tilastollista aineistoa ei ole saatavilla sisäänmenomuuttujien arvoista, joudutaan niihin liittyvä epävarmuus kvantifioimaan asiantuntija-arvioiden avulla. Ryhmän tekemän suppean kirjallisuushaun perusteella menetelmät tähän ovat moninaiset. Kuvaavaksi esimerkkiartikkeliksi nostettakoon (Cooke ja Slijkhuis, 2003), jossa arvioidaan Alankomaiden patovallien toimimattomuustodennäköisyysarvioihin liittyvää epävarmuutta puhtaasti asiantuntijoiden näkemysten pohjalta.

Käytettäessä herkyysanalyyseja päätöksenteon tukena tulee ottaa huomioon

¹⁰Ryhmän jäsenten hyväksi kokemia oppaita simuloinnin ulostuloanalyysistä ovat (Asmussen ja Glynn, 2007) ja (Efron ja Tibshirani, 1994).

se, että herkkyysanalyysillakaan ei saada kuvattua kaikkea mallintamiseen liittyvää epävarmuutta, koska käytettävä malli on väistämättä yksinkertaistus todellisuudesta, ja päätöksentekotilanteisiin liittyy usein sellaista epävarmuutta, jota ei etukäteen voi edes kuvitella saatika ennustaa. Kuitenkin Pappenberger ja Beven (2006) ehdottavat, että herkkyysanalyysin tulisi olla osana matemaattista mallinnusta aina, kun sisäänmenomuuttujiin liittyy epävarmuutta, kunhan herkkyysanalyysin rajoitteet tunnistetaan ja ne kommunikoidaan tulosten ohella päätöksentekijöille selvästi ja ymmärrettävästi.

5.2 Asiantuntija-arvioiden elisitointi

Asiantuntija-arvioiden elisitoinnilla tarkoitetaan menetelmiä kvantifioida ja koostaa asiantuntijoiden estimaatteja arvioitavasta suureesta sekä absoluuttisen arvon että siihen liittyvän epävarmuuden suhteen (Kerr, 1996). Todettakoon jo nyt, että projektiryhmä ymmärsi projektin loppuvaiheilla tämän tutkimuskentän perusteellisemmän selventämisen ylittävän laajuudeltaan ryhmän alkuperäisessä suunnitelmassa määrätyn työkapasiteetin. Seuraavassa pyritään kuitenkin selventämään, mistä on kyse, sekä tarjoamaan lukijalle jatkopolkuja, mikäli elisitointimenetelmiä tarvitaan.

Matemaattisessa mallinnuksessa tarvitaan usein arvoja suureista, joita on hyvin hankala tai käytännössä mahdoton mitata tai estimoida tieteellisin keinoin. Tällöin voidaan ajatella, että mikäli asiantuntijat pystyvät esittämään arvioita halutulle suureen arvolle, ovat nämä arviot käyttökelpoisempia kuin ”ei mitään”.

Koska asiantuntijat ovat itsetietoisia ja ajattelevia ihmisiä useimpien muiden fysikaalisten objektien sijaan, on asiantuntijoissa datalähteenä omanlaatuisia piirteitä, jotka täytyy ottaa huomioon datankeruussa (Cooke, 1991). Esimerkiksi kun asiantuntijoilta kysytään arvioita tiettyyn arvoon liittyvästä epävarmuudesta, tulee kiinnittää huomiota ainakin siihen, että kysymyksenasettelu on yksikäsitteisesti ymmärrettävä kaikille asiantuntijajoukon jäse-

nille. Elisitointimenetelmien joukossa onkin laaja kirjo erilaisia tapoja esittää kysymyksiä ja yhdistellä vastauksia yhtenäiseksi arvioksi. Kullakin menetelmällä on oma soveltuvuusalueensa (Cooke, 1991). Teokset (Ayyub, 2001) ja (Cooke, 1991) vaikuttavat suppean lukemisen perusteella hyviltä lähteiltä aloittaa elisitointimenetelmiin liittyvä tarkempi katsaus tarpeen vaatiessa.

6 Yhteenveto ja johtopäätökset

Tässä projektissa tutkittiin menetelmiä kuljetustoimintojen resurssointiin vakavissa häiriötilanteissa. Tarkastelu aloitettiin miettimällä kuinka häiriötilanteisiin voisi varautua, niin että puolustusvoimien tai muun yhteiskunnan kriittiset toiminnot ei heikkenisi huomattavasti. Työssä kehitettiin myös malleja häiriötilanteisiin, jotka eskaloituvat niin vakaviksi että resursseja joudutaan jakamaan puolustusvoimien ja muun yhteiskunnan välille. Malleja kuvattiin yhteisen viitekehyksen avulla. Viitekehys sisältää muun muassa kuvauksen malleista, sekä selvityksen mallien rajoituksista ja soveltuvuuskohteista. Mallien käytön tukemiseksi raporttiin sisällytettiin työkaluja, joiden avulla voidaan suorittaa herkkyysanalyyskejä tai elisitoida asiantuntija-arvioita. Käytetyt mallit lyhyine kuvauksineen on listattu liittessä C.

Projektin tuloksiksi saatiin joukko hyödyllisiä menetelmiä, jotka lähestyvät ongelmakenttää hieman eri näkökulmista. Varautumiskeinot hyödyntävät suurelta osin uusia teknologioita, jotka muuttavat koko toimintaympäristöä, mikä pakottaa miettimään vakaviin häiriötilanteisiin varautumista pitkällä aikajänteellä. Leontiefin tuotos-panos-malli on taloustieteessä käytetty viitekehys, joka vaikuttaa käyttökelpoiselta ja lupaavalta. Malliin liittyviä tuotos-panos-taulukoita ja esimerkkitoteutuksia on runsaasti saatavilla. Dynaamiset reititysongelmamallit ovat varteenotettava vaihtoehto logistiikkaprosessien tehostamiseen, mutta niiden implementointi yritysten toiminnanohjausjärjestelmiin saattaa olla hankalaa. Sijoittamisongelmiin voidaan vastata peittomalleilla, joita on helppo käyttää, sillä ne eivät vaadi moni-

mutkaista ongelman formulointia tai paljoo dataa toimiakseen. Huutokaupat ovat mielenkiintoinen ja teoreettisesti tehokas keino resurssien jakamiseen. Niiden kohdalla kysymysmerkiksi jää kuitenkin käytännön toteutettavuus.

Projektille asetettiin kolme eri tärkeäksi koettua tavoitetta. Ensimmäisenä tavoitteena oli vastata kirjallisuuskatsauksen avulla tutkimuskysymyksiin, sekä pohtia yleisemmin kuljetusresurssien jakamiseen liittyvää problematiikkaa. Tavoite saavutettiin tietyiltä osin, sillä löydettyjen mallien ja menetelmien avulla kysymyksiin voidaan vastata tietyissä tapauksissa, mikäli mallien rajoitteet otetaan huomioon. Toinen tavoite liittyi mallien käytettävyyden arviointiin. Arviointi suoritettiin yhteisen viitekehityksen avulla, jolloin jokaista malliluokkaa käsiteltiin samalla tavalla. Työn edetessä huomasimme, että kokemuksellamme ja näkemyksellämme emme pysty arvioimaan kaikkia mallien ominaisuuksia kovinkaan perinpohjaisesti. Tähän tarvittaisiin asiantuntija-apua. Myös menetelmien implementoitavuuden ja tulosten merkittävyyden arviointi on hankalaa ilman itse mallintamista, kun ei ole tietoa mallinnusprosessin aikana kohdatuista haasteista. Viimeisenä tavoitteena oli tuottaa katsaus mallien käyttöä tukeviin menetelmiin. Tämä tavoite jäi hieman keskeneräiseksi, koska ryhmä ei ollut varannut tarpeeksi aikaa tavoitteen saavuttamiseksi. Löysimme kuitenkin kirjallisuutta, josta tilaajan on hyvä aloittaa aiheeseen perehtymistä.

Projektissa tuotettiin yleiskatsaus ongelman kannalta hyödyllisiin menetelmiin, eikä erikoistuttu vain yhteen malliin. Yhteen malliin erikoistuminen olisi vaatinut valtavan työmäärän, mikäli olisi haluttu tuottaa oikeasti hyödyllinen ja käyttökelpoinen ohjelma, jota olisi voitu testata käytännössä esimerkiksi varautumiseen liittyvissä harjoituksissa. Asiakas koki yleiskatsauksen arvokkaana tuotoksena, josta voidaan luontevasti siirtyä kohti jotakin tiettyä mallia, ja tuottaa siitä toimiva ohjelma. Raportti tarjoaakin monia jatkokehitysmahdollisuuksia tilaajalle.

Viitteet

- B Adenso-Diaz ja F Rodriguez. A Simple Search Heuristic for the MCLP: Application to the Location of Ambulance Bases in a Rural Region. *Omega*, 25(2):181–187, 1997.
- Søren Asmussen ja Peter W Glynn. *Stochastic Simulation: Algorithms and Analysis*, osa 57. Springer Science & Business Media, 2007.
- Lawrence M Ausubel ja Paul Milgrom. The Lovely but Lonely Vickrey Auction. *Combinatorial Auctions*, 17:22–26, 2006.
- Bilal M Ayyub. *Elicitation of Expert Opinions for Uncertainty and Risks*. CRC Press, 2001.
- Gerald G Brown ja Glenn W Graves. Real-Time Dispatch of Petroleum Tank Trucks. *Management Science*, 27(1):19–32, 1981.
- Business Insider. Autonomous Cars Could Save the 1.3 Trillion Dollars a Year. <http://www.businessinsider.com/morgan-stanley-autonomous-cars-trillion-dollars-2014-9?IR=T>, 2014. Haettu: 27-04-2015.
- Helena Carvalho, Ana P Barroso, Virgínia H Machado, Susana Azevedo ja Virgílio Cruz-Machado. Supply Chain Redesign for Resilience Using Simulation. *Computers & Industrial Engineering*, 62(1):329–341, 2012.
- Richard Church ja Charles R Velle. The Maximal Covering Location Problem. *Papers in Regional Science*, 32(1):101–118, 1974.
- Roger M Cooke. Experts in Uncertainty: Opinion and Subjective Probability in Science. 1991.
- Roger M Cooke ja Karen A Slijkhuis. Expert Judgment in the Uncertainty Analysis of Dike Ring Failure Frequency. *Case Studies in Reliability and Maintenance*, sivut 331–350, 2003.
- Teodor Gabriel Crainic ja Gilbert Laporte. Planning Models for Freight

- Transportation. *European Journal of Operational Research*, 97(3):409–438, 1997.
- Erik Dietzenbacher ja Michael L Lahr. *Wassily Leontief and Input-Output Economics*. Cambridge University Press, 2004.
- Bradley Efron ja Robert J Tibshirani. *An Introduction to the Bootstrap*. CRC Press, 1994.
- Mauro Falasca, Christopher W Zobel ja Deborah Cook. A Decision Support Framework to Assess Supply Chain Resilience. *Proceedings of the 5th International ISCRAM Conference*, sivut 596–605, 2008.
- Thomas A Feo ja Mauricio GC Resende. Greedy Randomized Adaptive Search Procedures. *Journal of Global Optimization*, 6(2):109–133, 1995.
- Roberto Diéguez Galvão ja Charles ReVelle. A Lagrangean Heuristic for the Maximal Covering Location Problem. *European Journal of Operational Research*, 88(1):114–123, 1996.
- Yacov Y Haimes ja Pu Jiang. Leontief-Based Model of Risk in Complex Interconnected Infrastructures. *Journal of Infrastructure systems*, 7(1):1–12, 2001.
- Yacov Y Haimes, Barry M Horowitz, James H Lambert, Joost Santos, Kenneth Crowther ja Chenyang Lian. Inoperability Input-Output Model for Interdependent Infrastructure Sectors. II: Case Studies. *Journal of Infrastructure Systems*, 11(2):80–92, 2005a.
- Yacov Y Haimes, Barry M Horowitz, James H Lambert, Joost R Santos, Chenyang Lian ja Kenneth G Crowther. Inoperability Input-Output Model for Interdependent Infrastructure Sectors. I: Theory and Methodology. *Journal of Infrastructure Systems*, 11(2):67–79, 2005b.
- Stéphane Hallegatte. An Adaptive Regional Input-Output Model and Its Application to the Assessment of the Economic Cost of Katrina. *Risk Analysis*, 28(3):779–799, 2008.

- Stéphane Hallegatte, Nicola Ranger, Olivier Mestre, Patrice Dumas, Jan Corfee-Morlot, Celine Herweijer ja Robert Muir Wood. Assessing Climate Change Impacts, Sea Level Rise and Storm Surge Risk in Port Cities: A Case Study on Copenhagen. *Climatic change*, 104(1):113–137, 2011.
- Stephan Hartmann. The World as a Process. Teoksessa *Modelling and Simulation in the Social Sciences From the Philosophy of Science Point of View*, sivut 77–100. Springer, 1996.
- Fanny Henriët ja Stéphane Hallegatte. Assessing the Consequences of Natural Disasters on Production Networks: A Disaggregated Approach. 2008.
- Richard A Kerr. A New Way to Ask the Experts—Rating Radioactive Waste Risks. *Science*, 274(5289):913–914, 1996.
- Paul Klemperer. How (Not) to Run Auctions: The European 3G Telecom Auctions. *European Economic Review*, 46(4):829–845, 2002.
- Dorota Kurowicka ja Roger M Cooke. *Uncertainty Analysis With High Dimensional Dependence Modelling*. John Wiley & Sons, 2006.
- Allan Larsen, Oli BG Madsen ja Marius M Solomon. Recent Developments in Dynamic Vehicle Routing Systems. Teoksessa *The Vehicle Routing Problem: Latest Advances and New Challenges*, sivut 199–218. Springer, 2008.
- Wassily Leontief. *Input-Output Economics*. Oxford University Press, 1986.
- Adam B Levy. *The Basics of Practical Optimization*. Siam, 2009.
- Risto Linturi, Osmo Kuusi ja Toni Ahlqvist. Suomen Sata Uutta Mahdollisuutta: Radikaalit Teknologiset Ratkaisut. *Eduskunnan Tulevaisuusvaliokunnan Julkaisu*, 6:2013, 2013.
- Cameron A MacKenzie, Joost R Santos ja Kash Barker. Measuring Changes in International Production From a Disruption: Case Study of the Japanese

- Earthquake and Tsunami. *International Journal of Production Economics*, 138(2):293–302, 2012.
- Debasis Mishra ja Dharmaraj Veeramani. Vickrey–Dutch Procurement Auction for Multiple Items. *European Journal of Operational Research*, 180(2):617–629, 2007.
- Robert J Moffat. Describing the Uncertainties in Experimental Results. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1(1):3–17, 1988.
- Roberto Montemanni, Luca Maria Gambardella, Andrea Emilio Rizzoli ja Alberto V Donati. Ant Colony System for a Dynamic Vehicle Routing Problem. *Journal of Combinatorial Optimization*, 10(4):327–343, 2005.
- Nobel Media AB. Wassily Leontief - Facts. http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/economic-sciences/laureates/1973/leontief-facts.html, 2014. Haettu: 30-04-2015.
- F Pappenberger ja Keith J Beven. Ignorance Is Bliss: Or Seven Reasons Not to Use Uncertainty Analysis. *Water Resources Research*, 42(5), 2006.
- Marco Percoco. A Note on the Inoperability Input-Output Model. *Risk Analysis*, 26(3):589–594, 2006.
- PwC. Look Mom, No Hands! <http://www.detroitchamber.com/wp-content/uploads/2012/09/AutofactsAnalystNoteUSFeb2013FINAL.pdf>, 2013. Haettu: 27-04-2015.
- Nicola Ranger, Stéphane Hallegatte, Sumana Bhattacharya, Murthy Bachu, Satya Priya, K Dhore, Farhat Rafique, P Mathur, Nicolas Naville, Fanny Henriet et al. An Assessment of the Potential Impact of Climate Change on Flood Risk in Mumbai. *Climatic Change*, 104(1):139–167, 2011.
- M Jaradat Ra'ed ja Charles B Keating. Fragility of Oil as a Critical Infrastructure Problem. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 7(2):86–99, 2014.

- Charles ReVelle, Michelle Scholssberg ja Justin Williams. Solving the Maximal Covering Location Problem With Heuristic Concentration. *Computers & Operations Research*, 35(2):427–435, 2008.
- Andrea Saltelli, Marco Ratto, Terry Andres, Francesca Campolongo, Jessica Cariboni, Debora Gatelli, Michaela Saisana ja Stefano Tarantola. *Global Sensitivity Analysis: The Primer*. John Wiley & Sons, 2008.
- Yossi Sheffi. Supply Chain Management Under the Threat of International Terrorism. *The International Journal of Logistics Management*, 12(2):1–11, 2001.
- The New York Times. U.S. Military Orders Less Dependence on Fossil Fuels. http://www.nytimes.com/2010/10/05/science/earth/05fossil.html?pagewanted=all&_r=0, 2010. Haettu: 03-05-2015.
- Tilastokeskus. Kansantalouden Tilinpito - Panos-Tuotos. <http://www.stat.fi/til/pt/index.html>, 2014. Haettu: 30-04-2015.
- Durk-Jouke Van Der Zee ja Jack GAJ Van Der Vorst. A Modeling Framework for Supply Chain Simulation: Opportunities for Improved Decision Making*. *Decision Sciences*, 36(1):65–95, 2005.

A Itsearvio

A.1 Projektin kulku

Projektin alussa tehtävänanto vaikutti hyvin laajalta, ja siitä oli hieman vaikea saada tarttumapintaa. Ensimmäisen asiakastapaamisen jälkeen ymmärsimme ongelmakenttää hieman paremmin, mutta koimme edelleen haasteelliseksi jonkin oikeasti hyödyllisen mallin luomisen asiakkaalle. Onneksi toisessa tapaamisessa tuntui siltä, että osasimme kysyä oikeat kysymykset ja ryhmälle selvisikin, että asiakkaalle kirjallisuuskatsaus erilaisista malleista olisi käyttökelpoinen. Kolmanteen tapaamiseen suunnittelimme eräänlaisen viitekehyyksen, jonka perusteella arvioisimme löytämiämme malleja ja kerroimme myös lisäyksistä alkuperäiseen projektisuunnitelmaan. Asiakas näytti vihreää valoa suunnitelmillemme, ja projekti vietiin maaliin näitä ajatuksia noudattaen.

A.2 Projektin työmäärä ja työnjako

Viikoittainen työmäärä vaihteli projektin edetessä. Projektin alkuvaiheilla emme oikein tienneet mihin suuntaan edetä, joten silloin oli hieman rauhallisempaa. Projektin edetessä asiakastapaamisten ja seminaarien avulla ryhmän kuva ongelmakentästä parantuntui, mikä puolestaan innosti ryhmän jäseniä työskentelemään enemmän projektin eteen. Ryhmän jäsenten työkiireet ja lomat häiritsivät välillä projektiin keskittymistä, mutta onneksi vain lyhyeksi aikaa. Rivijäsenille asetettu työmäärä (5 op) pitikin suhteellisen hyvin paikkaansa. Vaikka projektipäälliköllä olikin hieman enemmän vastuita kuin rivijäsenillä, ei hänen työmääränsä ehkä aivan seitsemään opintopisteeseen yltänyt.

Projektin alussa pidettiin tärkeänä, että työmäärä jaettaisiin tasaisesti ryhmän jäsenten kesken, kuitenkin muistaen projektipäällikön vastuut ja tehtävät. Koska projektista tuli kirjallisuuskatsaustyyppinen, jokainen sai vas-

tuulleen erikoistua johonkin malliluokkaan. Jokainen ryhmän jäsen paneutui omaan malliluokkaansa yhtä perusteellisesti ja tuotti hyödyllisen katsauksen mallista loppuraporttiin. Pienemmät tehtävät yritettiin jakaa tasaisesti jäsenten kesken, mutta välillä tuntui siltä, että osa jäsenistä oli hieman omalotteisempia hoitamaan työnsä kuin toiset.

A.3 Paranneltavaa

Suurimmat parannuskohteet liittyvät kommunikaatioon, niin ryhmän sisäiseen kuin myös asiakkaan suuntaan. Ryhmä, mutta erityisesti myös projektipäällikkö, olisi voinut pitää tiiviimpää yhteyttä asiakkaaseen ja kertoa kuinka työ edistyy. Projektin edetessä tuntui välillä siltä, että kuukaudet vierivät todella nopeasti ja äkkiä sitä huomasikin, että edellisestä sähköpostista asiakkaalle oli kulunut kuukausi. Ryhmän sisäisessä kommunikaatiossa oli välillä aika pitkiä viiveitä, eikä välillä vastausta tullut ollenkaan. Tämä vaikeutti projektipäällikön toimintaa, jonka tehtävänä oli yrittää hallita projektin kokonaisuutta.

A.4 Mikä oli onnistunutta

Projektin onnistui lopulta hyvin, ja ryhmä sai tuotettua hyödyllisen katsauksen ongelmakentän kannalta hyödyllisiin menetelmiin. Loppuraportti on laaja katsaus eri tilanteisiin sopivia menetelmiä, joita on arvioitu tehtävänannon kannalta järkevällä tavalla. Projektissa tuotettiin myös lyhyt katsaus erilaisiin varautumiskeinoihin, jotka koettiin järkeväksi lisäykseksi alkuperäiseen tehtävänantoon.

Ryhmän sisäinen henki parani selvästi projektin edetessä, kun kaikki tustuivat paremmin toisiinsa. Töiden jakaminen ja asioista sopiminen sujui helposti, mikä oli projektin kannalta hieno asia.

Kurssi itsessään oli hyvin erilainen kuin monet muut kurssit ja sen aikana

huomasikin kuinka haasteellisia käytännön ongelmat voivat olla. Ekskursiot olivat mielenkiintoisia tapahtumia ja vaikuttikin siltä, että aiheet asettaneet tahot olivat oikeasti kiinnostuneita kaikista projekteista, ei vain omistaan.

B Haastattelut

Työtä varten projektiryhmä haastatteli kolmea eri asiantuntijaa. Asiantuntijat edustivat Huoltovarmuuskeskusta, puolustusvoimia sekä Öljy- ja biopolttoaineala ry:tä. Haastatteluiden tarkoituksena oli kehittää projektiryhmän kuvaa käsiteltävästä ongelmasta ja erilaisista tavoista, joilla ongelmakentän aiheita ratkotaan nykyään. Haastatteluissa pyrittiin myös kartoittamaan eri osapuolten mahdollisia ratkaisutoiveita. Seuraavassa pääkohtia haastatteluiden tuloksista.

Haastatteluista saatiin vahvistusta projektiryhmän saamaan käsitykseen siitä, että säiliöautoja on Suomessa vain nykyiseen tarpeeseen. Käytetty kalusto on myös erittäin tehokkaassa käytössä. Kaluston omistavat logistiikkayritykset vastaanottavat öljytilaukset ja seuraavat kuljetuksia tietojärjestelmiensä avulla, mikä mahdollistaa tehokkaan kuljetusreittien suunnittelun.

Vakavan häiriötilanteissa aikana puolustusvoimien tarve polttoaineelle saattaa kasvaa. Haastatteluista kävi ilmi, että häiriötilanteen aikana ongelmaksi muodostuu polttoainekuljetusten järjestäminen välivarastoille, eikä puolustusvoimien sisäinen polttoainejakelu. Puolustusvoimat pystyy järjestämään kuljetukset välivarastoilta omalla kalustolla, jonka määrää yritetään kasvat-
taa koko ajan.

Polttoainelogistiikkaan kohdistuvat häiriöt voivat aiheuttaa puolustusvoimille suuria vaikeuksia monelta suunnalta, sillä kaikki aselajit tarvitsevat polttoainetta. Puolustusvoimat ovat riippuvaisia häiriötilanteissa lähes kaikista siviiliyhteiskunnan aloista, jolloin puolustusvoimien kannalta on erittäin tärkeää varmistaa siviiliyhteiskunnan toimivuus.

Yritykset ovat varautuneet häiriötilanteita varten ja tätä varautumisen tasoa seurataan. Polttoainelogistiikan saralla haasteena on logistiikkayitysten pieni koko, sillä pienillä yrityksillä ei välttämättä ole resursseja häiriötilannesuunnitelmien tekoon. Viranomaisilla on olemassa säännöstelysuunnitelmat häiriöiden varalta, mutta myös varmuusvarastoja, muun muassa öljylle.

Haastatteluista kävi myös ilmi että polttoainelogistiikka toimisi normaalin markkinalogiikan mukaan erittäin pitkään. Valmiuslain on oltava voimassa, jotta polttoainetta voitaisiin säännöstellä tai säiliöautoja takavarikoida. Valmiuslain voimassaollessa viranomaisilla on mahdollisuus keskusjohtoiseen polttoaineenjakeeluun.

Haastateltujen mukaan yritysten toiveita ratkaisuja pohdittaessa olisivat ainakin korvaukset pakkolunastuksista ja tieto siitä, jos jonkin yrityksen säiliöauto aiotaan pakkolunastaa. Puolustusvoimien toiveita arveltiin olevan ainakin osaavien kuljettajien saatavuuden varmistaminen.

B.1 Haastattelukysymykset

Ongelmakentän kartoittaminen

Mitä energiahuolto tarkoittaa käytännössä?

Mitkä ovat Suomen energiahuollon kulmakivet?

Voiko Suomi päättää itsenäisesti energiahuollostaan, vai vaikuttaako EU ja IEA paljonkin päätöksentekoon?

Kuinka paljon öljynkuljetuskapasiteettia Suomessa on tällä hetkellä?

Kuinka suuria öljynkuljetusrekkatarpeita puolustusvoimilla on erilaisissa häiriötilanteissa suhteessa koko Suomen kokonaiskuljetuskapasiteettiin?

Minkälaisia ja kuinka suuria ongelmia puolustusvoimille aiheutuu jos tarvittavaa määrää öljyrekkoja ei ole saatavissa?

Mistä siviiliyhteiskunnan aloista puolustusvoimat ovat riippuvaisia häiriötilanteessa?

Minkälaisia ja kuinka suuria ongelmia puolustusvoimille aiheutuu jos nämä alat eivät kykene tuottamaan puolustusvoimien tarvitsemia palveluita?

Kuinka pienellä varoitusaajalla siviiliosapuolet luovuttaisivat kuljetuskapasiteettia viranomaiskäyttöön häiriötilanteessa? Mitä seurauksia eri aikatauluilla tulisi olemaan?

Nykytilan kartoittaminen

Millaisia pitkän aikavälin etukäteiskeinoja hyödynnetään häiriötilanteisiin varautumisessa polttoainehuollon osalta?

Kuinka siviilitoimijoiden ja viranomaisten välinen yhteistyö etukäteisvarautumisessa toimii? (kommunikaatiokanavat?)

Miten häiriötilanteissa toimitaan akuutisti, onko joitakin toimintasuunnitelmia?

Kuka vastaa päätöksenteosta kuljetuskapasiteetin käyttöönotto-tilanteissa? Onko siviilipuolelle sovittu yhteyshenkilöitä?

Missä määrin viranomaiset nojaisivat siviilitoimijoiden polttoaineidenjakeluverkostoon häiriötilanteen aikana?

Kuinka siviilitoimijoiden ja viranomaisten välinen akuutti yhteistyö toimisi häiriötilanteessa?

Miten esim. sähkö jaetaan yllättävässä häiriötilanteessa, kuinka paljon kukin saa?

Kuinka hyvin ja millä tavoin siviiliyhteiskunta (ml. elinkeinoelämä) sopeutuisi pienempään polttoainehuoltokapasiteettiin kriisitilanteessa?

Millä logiikalla siviilitoimijoiden polttoaineentarjontaverkosto toimisi kriisitilanteessa (markkinalogiikka, jokin muu ratkaisu)?

Yrityksen kohtaaman logistiikkaongelman kartoittaminen

Millä tavalla polttoainetilausten vastaanottaminen toimii?

Ovatko tilaukset tiettyyn kohteeseen aina samansuuruisia?

Kuinka nopeasti tilaukset pitää toimittaa tilaajalle?

Kyetäänkö säiliöautojen reittiä muuttamaan kesken polttoaineen viennin?

Toimijoiden toiveiden kartoittaminen

Mitä asioita yritykset tahtoisivat että otetaan huomioon kun mietitään öljyrekkujen varaamista puolustusvoimien käyttöön

Mitä asioita puolustusvoimat haluaisivat ottaa huomioon kun mietitään öljyrekkujen varaamista puolustusvoimien käyttöön?

C Yhteenvedo työssä käsitellyistä malleista

Mallin nimi	Käyttökohde	Arvio
Tuotos-panosmallit	Yhteiskunnan eri sektoreiden korkean tason vuorovaikutusten tarkastelu	Hyödyllinen työkalu suuren mittakaavan vaikutusten analysointiin. Tekninen toteutus ei ole suoraviivainen ja sen tarkkuus on rajallinen.
Simulointimallit	Eriolaisten ajasta riippuvien prosessien käyttäytymisen tutkiminen	Laaaja kategoria malleja, joiden hyödyllisyys riippuu paljon siitä, miten ne rakennetaan. Käytännöllisiä monimutkaisten prosessien toiminnan ymmärtämiseen ja ennustamiseen päätöksenteon tukena.
Huutokauppa-mekanismit	Pakkokäyttöön oton järjestäminen	Tehokas ja reilu tapa järjestää pakkokäyttöönotto. Vaarana huonosti suunnitellun mekanismin aiheuttamat epätoivotut lopputulokset.
Dynaaminen reititysongelma	Säiliöautojen reitin suunnittelu	Paljon tutkittu ja yleisesti käytössä oleva optimointimalli. Tärkeässä osassa säiliöautojen tehokkaan käytön suunnittelussa. Haasteena suunnitella riittävän laaja malli, joka voidaan ratkaista kohtuullisessa ajassa.
Suurimman peiton ongelma	Jakelupisteiden sijainnin valinta	Mallin avulla voidaan löytää optimaaliset paikat toimintakuntoon jääville jakeluasemille tai paras paikka uudelle asemalle. Hyödyllinen, mutta kapea-alainen malli.