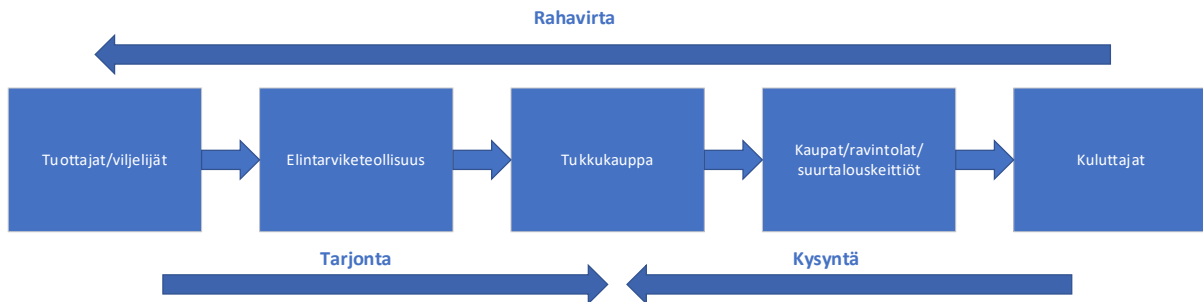


Selvitys ruoantuotannon toimitusketjujen mallinnusmenetelmistä

Pohjola, J. & Lipping, T. Tampereen yliopisto

JOHDANTO

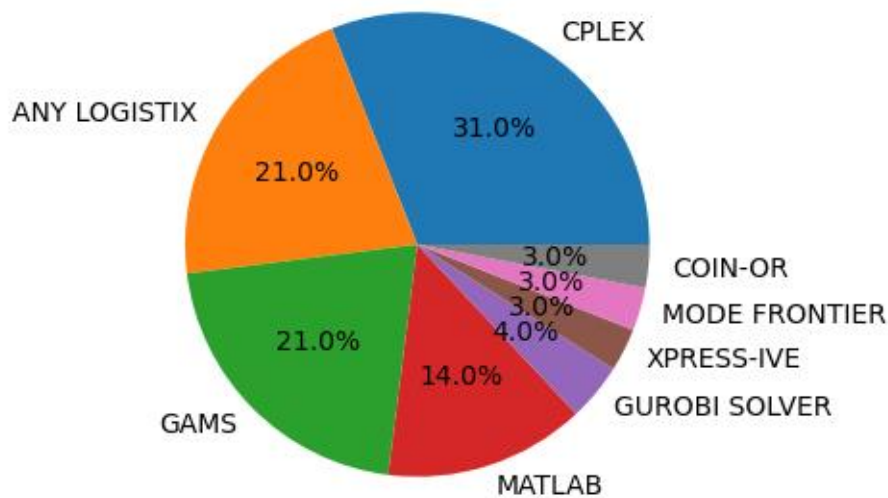
Ruoantuotannon toimitusketjuihin liittyvä tutkimus ja mallinnus sijoittuu operaatiotutkimuksen ja maataloustutkimuksen rajapintaan. Yleiskuva ruoantuotannon toimitusketjusta on esitetty Kuvassa 1. Poikkeuksena esim. teollisuustuotantoon, ruoantuotannon toimitusketjun alkupäässä on alkutuottaja/viljelijä, jonka tuotanto on elintarviketeollisuuden näkökulmasta raaka-aine. Samalla alkutuottaja on riippuvainen muiden raaka-aineiden (polttoaine, lannoitteet, siemenet) saatavuudesta. Alkutuottaja voi myydä tuotantoaan suoraan tukkukauppaan, vähittäiskauppaan tai kuluttajalle, vaikka useimmiten välissä on elintarviketeollisuus, jossa tuotteen jalostusastetta nostetaan. Oman erityispiirteensä ruokaketjuun tuo useiden sen tuotteiden aikakriittisyys eli tuotteet on saatava kuluttajalle tietyssä ajassa ja niitä on säilytettävä tietyissä olosuhteissa. Ruoantuotannon toimintavarmuuteen vaikuttavat useat tekijät kuten esimerkiksi sääolosuhteet ja ympäristötekijät. Samalla ruoantuotanto on yhteiskunnan huoltovarmuuden kannalta keskeisessä roolissa.



Kuva 1. Ruoantuotannon toimitusketju lohkokaaavana.

Ruoantuotannon toimitusketjujen mallinnukseen käytetyt työkalut/ohjelmistot

Ruoantuotannon toimitusketjujen mallinnukseen on tarjolla useita ohjelmistoja. On olemassa sekä kaupallisia että avoimeen lähdekoodiin perustuvia työkaluja. (Beshara et al., 2022) ovat tutkineet mitä työkalua on käytetty toimitusketjujen mallinnukseen alaan liittyvissä tieteellisissä julkaisuissa (Kuva 2). Listauksessa on mukana erityisesti toimitusketjujen suunnitteluun tarkoitettuja ohjelmistoja, esim. anyLogistix, simulointi- ja optimointialustoja, esim. CPLEX sekä yleiskäyttöisiä laskentatyökaluja kuten Matlab. Seuraavassa osiossa on kuvaukset julkaisuissa esitetyistä eniten käytetyistä työkaluista ja miten niitä voidaan käyttää maatalouden ruoantuotannon toimitusketjujen mallinnukseen.



Kuva 2. Kaavio ruoantuotannon toimitusketjujen mallinnukseen käytettyjen ohjelmistojen osuuksista (Beshara et al., 2022) perusteella.

CPLEX

Linkki: <https://www.ibm.com/products/ilog-cplex-optimization-studio/cplex-optimizer>

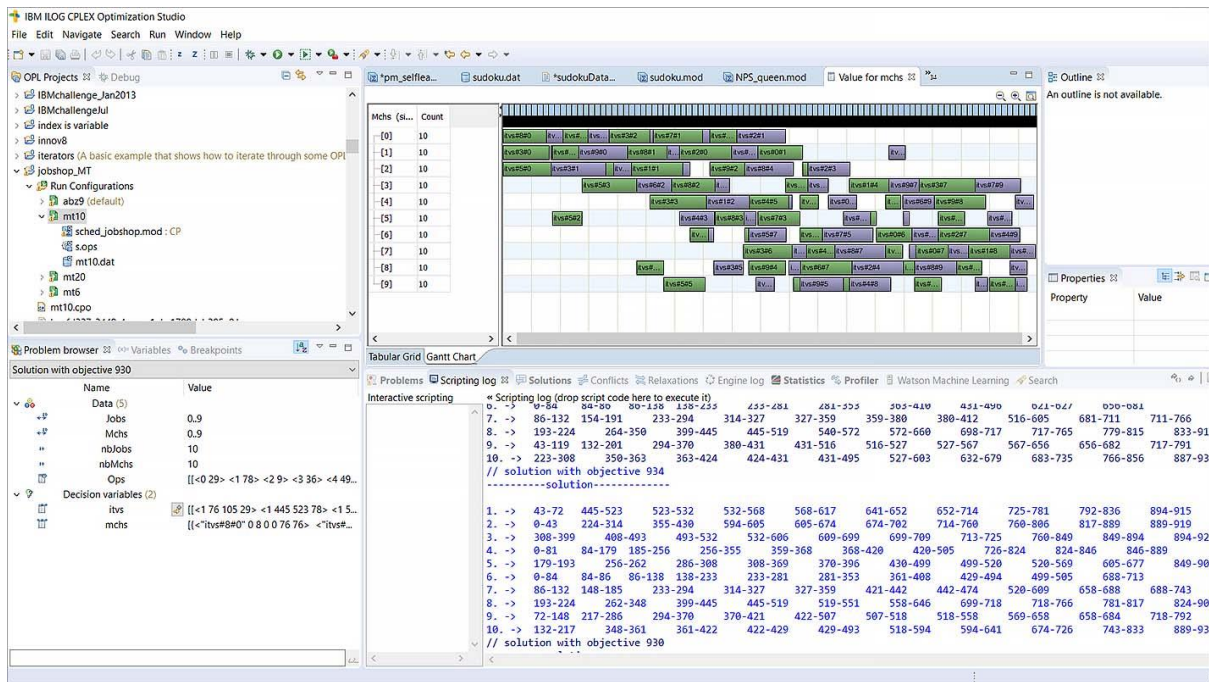
IBM ILOG CPLEX Optimization Studio (usein käytetään pelkkää lyhennettä CPLEX) on optimointiin tarkoitettu ohjelmistopaketti. Sillä voidaan ratkaista erityyppisiä matemaattisia ongelmia. CPLEX sisältää rajapinnan C++, C#, Java sekä Python-ohjelmointikielille.

Muun muassa (Bottani et al., 2019) ovat käyttäneet CPLEX:ää resilientin ruoantuotannon toimitusketjun suunnitteluun. (De et al., 2022) ovat tehneet optimointimallin norjalaisen lohen toimitusketjusta CPLEX:llä.

Ohjelmiston kotisivuilla kerrotaan esimerkiksi ruoantuotannon toimitusketjun optimoinnista (<https://www.ibm.com/case-studies/biosco-sas-cloud-cplex>). Optimoinnin tuloksena kuljetuskustannukset ovat pienentyneet 10–15 % ja samalla ketjun hiilijalanjälki on pienentynyt.

IBM ILOG CPLEX Optimization Studio on kaupallinen ohjelmisto. Ohjelmiston hinta on 199 dollaria kuukaudessa/käyttäjää. Ohjelmistosta on saatavilla myös rajoitettu ilmaisversio.

Kuvassa 3 on esitetty miten CPLEX:ää on käytetty optimoimaan tehtävien suoritusjärjestys. Optimoinnille voidaan määritellä erilaisia tavoitteita ja simuloida tehtäväjärjestystä sen mukaan.



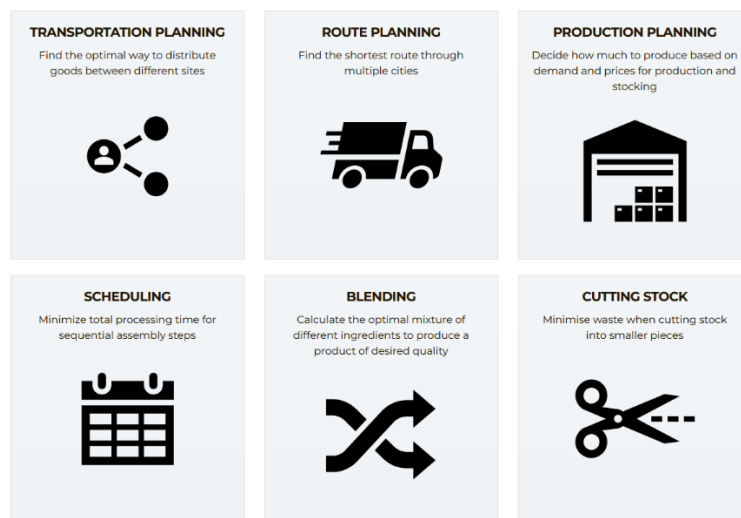
Kuva 3. Näkymä IBM ILOG CPLEX Optimization Studiosta. Kuvan esimerkissä on aikataulutussongelman simulointia (<https://www.ibm.com/products/ilog-cplex-optimization-studio>).

Linkki: <https://www.ibm.com/products/ilog-cplex-optimization-studio/cplex-optimizer>

GAMS

Linkki: <https://www.gams.com/>

GAMS (General Algebraic Modeling System) on optimointiin käytettävä työkalu, jota voidaan käyttää ruoantuotannon toimitusketjujen mallinnukseen. Kuvassa 4 on esitetty eri tapoja käyttää GAMS:ia toimitusketjun optimointiin: mm. reittisuunnitteluun, tuotannon suunnitteluun, aikataulutukseen jne.



Kuva 4. Esimerkkejä GAMS:n käyttötavoista (https://www.gams.com/discover_gams/#gams).

Lisäksi <https://www.gams.com/latest/docs/> -osoitteesta löytyy paljon valmiita mallikirjastoja. GAMS on kaupallinen ohjelmisto. Ohjelmiston perusversio on hinnaltaan 3500 dollaria, tutkimuskäyttöön tarkoitettu versio maksaa 700 dollaria. Tämän lisäksi hankittavissa on erilaisia lisäpaketteja, joiden hinnat vaihtelevat välillä 1750–14000 dollaria, tutkimuskäytössä 350–2100 dollaria. Lisäksi saatavilla on ominaisuuksiltaan rajoitettu kokeiluversio.

Muun muassa (David et al., 2022), (Jahanshahee Nezhad et al., 2021) ja (Keshavarz-Ghorbani and Pasandideh, 2022) ovat käyttäneet GAMS:ia ruoantuotannon toimitusketjujen mallinnukseen.

ANYLOGISTIX

Linkki: <https://www.anylogistix.com/>

anyLogistix on ohjelmisto toimitusketjujen suunnitteluun ja niiden hallintaan digitaalista kaksosta käyttäen. Kaupalliseen käyttöön tarkoitettu versio ohjelmistosta maksaa 20 000 dollaria/vuosi. Ohjelmistosta on saatavissa myös ominaisuuksiltaan rajoitettu ilmainen versio anyLogistix PLE, joka on tarkoitettu tutkimuskäyttöön.

anyLogistix yhdistää toimitusketjun suunnittelun, optimoinnin ja simuloinnin operaatiodataan mahdollistaen verkostoanalyysin. Kuvassa 6 on esitelty anyLogistix-ohjelmiston rakenne. Se yhdistää aiemmin esitellyt CPLEX-laskenta-algoritmit AnyLogicin kehittämiin simulointimenetelmiin.



Kuva 6. Any Logistix -ohjelmiston rakenne (<https://www.anylogistix.com/features/supply-chain-simulation/>).

Kuvassa 7 kuvataan anyLogistixin reaaliaikaista riskienhallintaominaisuutta, jossa esimerkiksi sää- tai talousdatan perusteella mallia/simulaatiota voidaan päivittää reaaliaikaisesti. Tämä parantaa toimitusketjumallinnuksen resilienssiä.



Kuva 7. anyLogistix-ohjelmiston riskienhallinta.

Esimerkkicasena anyLogistixin kotisivuilla (<https://www.anylogistix.com/case-studies/unearthing-profitability-via-cost-to-serve-optimization/>) on käsitelty ruoantuotannon toimitusketjun optimointia, jonka avulla on saavutettu merkittävä kustannussäästö. (Vitorino et al., 2022) ja (dos Santos Hermogenes et al., 2022) ovat käyttäneet anyLogistixia toimitusketjumallinnukseen.

MATLAB

Linkki: <https://se.mathworks.com/products/matlab.html>

MATLAB on The MathWorks -yhtiön numeeriseen laskentaan tarkoitettu tietokoneohjelmisto. MATLAB sisältää työkalut mm. matriisien käsittelyyn, datan visualisointiin ja algoritmien toteuttamiseen. Ohjelmistoon on saatavilla lukuisia työkalupaketteja, joiden avulla toiminnallisuutta voidaan laajentaa.

MATLAB on kaupallinen ohjelmisto. Sen perusversio maksaa 860 euroa/vuosi. Lisäksi on olemassa joukko eritasoisia lisenssejä mm. tutkimuskäyttöön. Mahdollisesti tarvittavat lisäpaketit kasvattavat hintaa.

(Fathi et al., 2023) ovat käyttäneet sekä GAMSia että MATLABia kestäväen ruoantuotannon toimitusketjun matemaattiseen mallinnukseen.

GUROBI SOLVER

Linkki: <https://www.gurobi.com/>

Gurobi on matemaattisten ongelmien ratkaisuun käytettävä ohjelmisto. Se sisältää useita erilaisia ratkaisijoita mm. lineaaristen ongelmien ratkaisuun. Gurobi on kaupallinen ohjelmisto, jonka hinta on 8395 dollaria.

Kuvassa 8 on esitelty Gurobin käyttöä maatalouden ruoantuotannon toimitusketjun suunnittelussa. Suunnittelu on jaettu seitsemään osa-alueeseen. Ensimmäisenä on kysynnän ennustaminen ja suunnittelu. Matemaattisen optimoinnin ja koneoppimismenetelmien yhdistelmällä pyritään parantamaan ennusteen tarkkuutta. Seuraavana kohtana on tarjolla olevien tuotteiden optimointi kysynnän ja tuoton kasvattamisen perusteella. Tämän jälkeen vuorossa on tuotannon suunnittelu ennustetun kysynnän perusteella tuoton maksimoimiseksi ja vastaamaan asiakkaiden tarpeisiin. Lisäksi ketjun suunnitteluun kuuluvat työvoiman ja koneiden käytön optimointi sekä tuotteiden kuljetuksen ja varastoinnin suunnittelu. Yhdistämällä nämä kaikki kohdat pyritään pääsemään tilanteeseen, jossa sekä tuotto että asiakkaiden tarpeet on huomioitu mahdollisimman optimaalisella tavalla.

Optimizing Operations Across The End-to-End Agribusiness Value Chain

With mathematical optimization, agribusiness companies can foster greater alignment, agility, efficiency, and profitability across their end-to-end operations.



Supply Chain Network Design



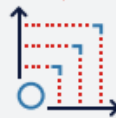
Demand Forecasting and Planning

Utilizing mathematical optimization techniques like constrained forecasting in combination with machine learning to improve forecast accuracy.



Product Portfolio Optimization

Selecting the best mix of products to satisfy market demand and increase profit.



Supply Planning

Optimally matching supply with forecasted demand to maximize profit margins and customer satisfaction.



Farming, Breeding, Collection, and Production Operations

Optimizing the utilization of critical resources (including workforce and machines) in order to boost efficiency and output and minimize costs.



Inventory Management

Optimizing inventory levels (storing the right amount and type of goods in the right locations at the right times) in order to reduce holding costs while maximizing service levels.



Transport and Distribution



Retail

Kuva 8. Esimerkki Gurobin käytöstä maataloustoimitusketjun analysoinnissa (<https://www.gurobi.com/wp-content/uploads/2022/08/IndustrySolutionSheet-Agriculture.pdf>).

YHTEENVETO

Vaikka ruoantuotantoketjulla on tiettyjä erityispiirteitä verrattuna muiden alojen tuotantoketjuihin, niiden analysointiin ja mallinnukseen käytetään enimmäkseen yleisiä optimointi- tai simulointityökaluja. Lähes kaikki julkaisussa (Beshara et al., 2022) mainitut työkalut ovat kaupallisia. Avoimen lähdekoodin työkaluista mainittiin COIN-OR (Computational Infrastructure for Operations Research; <https://www.coin-or.org/>), minkä kehitystyö on kuitenkin päättynyt muutama vuosi sitten.

Ruoantuotantoketjun analyysi on monitahoinen ongelma, jossa keskittyminen pelkästään tuotos-panos-suhteeseen ei välttämättä johda parhaaseen lopputulokseen. Yhä tärkeämpää on lopputuotteessa käytettävien raaka-aineiden jäljitettävyyys, tuotantoprosessin kestävyys sekä esim. hiilijalanjäljen määrittely. Ketjun mallinnusta ja sen eri muuttujien vaikutusta voidaan siis analysoida useamman eri kohdemuuttujan näkökulmasta. Myös mallinnuksessa käytettävän datan saatavuus vaikuttaa mallinnusmenetelmän valintaan.

Lähdeluettelo

- Beshara, S., Fors, H., Harraz, N., Elwany, M.H., 2022. Designing Supply Chain to Hedge Against Disruptions: A Review of Literature in General and Agro Food Supply Chains.
- Bottani, E., Murino, T., Schiavo, M., Akkerman, R., 2019. Resilient food supply chain design: Modelling framework and metaheuristic solution approach. *Comput. Ind. Eng.* 135, 177–198. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.05.011>
- David, D.U., Aikhuele, D.O., Ughehe, P.O., Tamuno, E.M., 2022. Multi-echelon, Multi-period Supply Chain Master Planning in the Food Process Industry: A Sustainability Concept. *Process Integr. Optim. Sustain.* 6, 497–512. <https://doi.org/10.1007/s41660-022-00229-3>
- De, A., Gorton, M., Hubbard, C., Aditjandra, P., 2022. Optimization model for sustainable food supply chains: An application to Norwegian salmon. *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.* 161, 102723. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2022.102723>
- dos Santos Hermogenes, L.R., de Almeida, I.D.P., Lellis Moreira, M.Â., de Araújo Costa, I.P., Gomes, C.F.S., dos Santos, M., de Oliveira Costa, D., de Moura Pereira, D.A., 2022. E-commerce Supply Chain analysis using the ANYLOGISTIX computational tool. *Procedia Comput. Sci.*, 9th International Conference on Information Technology and Quantitative Management 214, 487–494. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.11.203>
- Fathi, M.R., Zamanian, A., Khosravi, A., 2023. Mathematical modeling for sustainable agri-food supply chain. *Environ. Dev. Sustain.* <https://doi.org/10.1007/s10668-023-02992-w>
- Jahanshahee Nezhad, F., Taghizadeh-Yazdi, M., Heidary Dahooie, J., Zamani Babgohari, A., Sajadi, S.M., 2021. Designing a new mathematical model for optimising a multi-product RFID-based closed-loop food supply chain with a green entrepreneurial orientation. *Br. Food J.* 124, 2114–2148. <https://doi.org/10.1108/BFJ-06-2021-0670>
- Keshavarz-Ghorbani, F., Pasandideh, S.H.R., 2022. Modeling and optimizing an agro-supply chain considering different quality grades and storage systems for fresh products: a Benders decomposition solution approach. *J. Comb. Optim.* 44, 21–50. <https://doi.org/10.1007/s10878-021-00802-5>
- Vitorino, L., Costa, I.P.A., Terra, A.V., Medina, A.C., Gomes, C.F.S., Santos, M., 2022. Analysis of food distribution network using Anylogistix computational tool. *IFAC-Pap.*, 10th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control MIM 2022 55, 2018–2023. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.10.004>