

Professori RAIMO P. HÄMÄLÄINEN,  
Teknillinen korkeakoulu,  
Helsinki



Virkaanastujaisesitelmä  
8.12.1981

## Päätöksenteon ja informaatiotekniikan matematiikka

Sovelletun matematiikan monien osa-alueiden ja erityisesti päätöksenteon matematiikan kehityksen nousukohtat ovat usein olleet ainakin ajallisesti kytkeytyneitä sotiin tai sodanvalmisteluun. Varhaisia esimerkkejä olisi helppo löytää kaukaa historiasta. Tällä vuosisadalla ajoittui toiseen maailmansotaan ja sitä seuranneeseen aikaan monen nykyään merkittävän sovelletun matematiikan alan läpimurto. Tämä aikakausi merkitsi syntyä ainakin seuraaville sovelletun matematiikan aloille: informaatioteoria, klassinen peliteoria, operaatioanalyysi, kybernetiikka ja säätöteoria. Nämä esimerkit ovat päätöksenteon ja informaationkäsittelyn metodiikkaa käsitteleviä tutkimusaloja.

### THE MATHEMATICS OF DECISION-MAKING AND INFORMATION TECHNIQUES

*The high points in the development of many fields of applied mathematics and especially decision-making mathematics have often coincided with war or preparations for war. Early examples are easy to find way back in history. In this century the breakthrough of many fields of applied mathematics important today came during the Second World War and the period that followed it. This era meant the birth of at least the following fields of applied mathematics: information theory, classical games theory, operational analysis, cybernetics and control theory. These examples are branches of research that use the methods of decision-making and information handling. (Finnish)*

### Sotatieteestä — operaatiotutkimukseen

Tarkoitukseni ei ole keskittyä pohtimaan sodan ja matematiikan suhdetta. Kuitenkin sodankäynnin matematiikkaa on havainnollista käyttää päätöksentekoon ja optimointiin liittyvän matematiikan kulloisenkin kehitysvaiheen ilmentäjänä. On selvä tosiasia, että resurssien käyttö, päätöksenteko ja informaation käsittely ovat elintärkeitä kysymyksiä yhtä hyvin sodassa kuin kehittyneessä tietokoneyhteiskunnassa.

Operaatioanalyysin eli operaatiotutkimuksen katsotaan syntyneen toisen maailmansodan aikana halutaessa optimoida sotaoperaatioita eli

saavuttaa suurin mahdollinen hyöty rajoitetuilla resursseilla. Kohdeprobleemoina olivat esimerkiksi laivasto- ja ilmatorjunta-asemien sijoittelu.

Sodan jälkeen havaittiin resurssien optimaalisen käytön tehtävien olevan yleisiä kaikkialla tekniikassa ja taloudessa. Tästä lähti käyntiin operaatioanalyysin matemaattisen optimointivälaineistön kehittäminen. Olennainen piirre alkuaikojen metodiikalle oli staattisuus ja optimointi yhden kriteerin suhteen. Esimerkiksi laivasto- ja ilmatorjunta-asemien sijoittelu oli puhtaasti staattinen tehtävä. Ratkaisua määrättäessä ei ollut keinoa ottaa huomioon ajan mukana muuttuvia ympäristöolosuhteita tai omien ja

vastapuolen toimien vuorovaikutuksia. Tehtävä voitiin tietenkin aina ratkoa uudelleen mahdollisten laivamenetysten jälkeen. Kriteerit olivat myös selviä ja yksinkertaisia kuten minimoida laivatappiot kiinteän kokoista saattuetta käyttäen. Helppoja tehtäviä — voisi tämän päivän optimoijia sanoa.

### C<sup>3</sup>-systemit

Päätöksenteon matematiikassa taustatunutta muutosta kuvaa hyvin sodanjohtosovellutuksista syntyneiden ns. C<sup>3</sup> (C potenssiin 3) systeemien aivan viime vuosina osakseen saama suuri huomio. Kolme C:tä tulee englannin kielen sanoista Command — Control ja Communication. Aivan

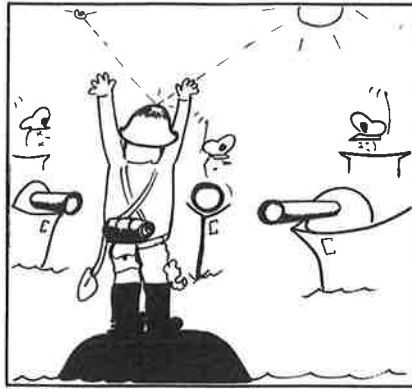
tarkkoja vastineita ei suomen kielessä ole, mutta karkeasti käännettyinä sanat ovat: johtaminen — ohjaus ja tiedonvälitys. Vaikka ei ole todennäköistä, että nimilyhenne OR — operations research — vaihtuu tulevaisuudessa C potenssiin kolmeksi, niin silti nämä kolme C:tä kuvaavat selkeästi päätöksenteon yleisen luonteen muuttumista. Voidaan sanoa, että perinteinen OR pohti taktisia ongelmia ja tekniikoita, mutta C<sup>3</sup> keskittyy strategiaan ja sodan voittamiseen. Nyt on kokonaisuus pääasia. Sotaa käydään monen eri aselajin yhteistoimintana. Suuren maan laivaston on päätettävä miten käyttää hävittäjiään, lentotukialuksiaan ja sukellusveneitään ohjuksineen erilaisiin taktisiin operaatioihin. Enää ei ole selvää miten muodostuu kokonaisuuden optimointikriteeri monista osakomponenteista. Monimutkaistuvat asejärjestelmät vaativat yhä useampaa päätöksentekijää ja se puolestaan tehtävien hajautusta, dynamiikan hallintaa ja nopeaa tiedonvälitystä. Satelliitti- ja tietoliikenneverkosto kerää hallinta- ja viesti-informaatiota suurella nopeudella. Mikä on paras tapa välittää verkossa eri tietoja luotettavuuden kärsimättä? Mikä on oikea määrä informaatiota? Liika tieto haittaa päätöksentekoa ja voi tukkeuttaa yhteydet.

C<sup>3</sup> probleemassa on siis ratkaistava laajan hajautetun ohjaussysteemin ja siihen liittyvän tiedonvälitysjärjestelmän dynaaminen resurssien allokointitehtävä nopeasti muuttuvassa ympäristössä. Kukaan operaatioanalyttikko ei enää rohkene puhua helposta tehtävästä. Päätöksenteko on siis paljon monimutkaisempi asia kuin parhaan vaihtoehdon valinta. Kyse on lähes yhtä paljon informaation rakenne-, välitys- ja käsittelyongelmasta kuin optimointiongelma.

### Staattisesta optimoinnista dynaamiseen informaatioproblemaan

Yhteenvetona voidaan todeta, että päätöksenteon problematiikan kehityssuunnat 40-luvulta 80-luvulle, ovat olleet:

- staattisesta dynaamiseen,
- rajoitetuista laajoihin probleemoihin,
- keskitetystä hajautettuun,
- yhdestä tavoitteesta useaan tavoitteeseen ja
- optimointiprobleemasta infor-



maatioproblemaan tai toisin sanoen päätöksentekoprobleemasta vuorovaikutusproblemaan.

Tälle samalle ajanjaksolle mahtuu nykyaikaisen laskennan perusvälineen tietokoneen koko historia monine eri sukupolveineen. Matemaattiset mallit ovat aina olleet vahvasti sidoksissa käytettävissä olevaan laskentavälineistöön. On siis luonnollista, että informaatiotekniikan uudet saavutukset heijastuvat myös metodiikan kehityssuunnissa. Tiedonkulun ja -käsittelyn nopeutuminen on osaltaan pakottanut vuorovaikutusten analyysiin ja dynamiikan mukaanottamiseen. Laskentakustannusten aleneminen on tehnyt mahdolliseksi yhä laajempien kokonaisuuksien käsittelyn. Halvat pien- ja mikrotietokoneet ovat osoittaneet hajautuksen edut. Laajojen ja hajautettujen probleemien mukana seuraa väistämättä monta tavoitetta. Yksi hyvyyskriteeri ei riitä kuvaamaan valinnan ongelmaa.

Merkittävä viime vuosien havainto on ollut operaatioanalyysin ja informaatiotekniikan ajankohtaisten matemaattisten ongelmien lähestyminen ja toisiinsa kytkeytyminen. Tämä on samalla lisännyt myös sovelletun matematiikan tutkimuksen sisäistä yhtenäisyyttä. Vielä jokin aika sitten optimointialgoritmien, verkkoteorian ja stokastiikan tutkijat eivät kokeneet toistensa ongelmia kovin kiinnostaviksi. Mutta nyt on esimerkiksi tietoliikenneverkkojen ja satelliittikommunikaation suunnittelu ja käyttö tuonut esiin merkittävän sovellustuskentän, joka pakottaa teoreetikot yhteistyöhön, koska ratkaisuissa vaaditaan kaikkien edellämainittujen matemaattisten teorioiden synteisiä.

### Komunikaatio: laskentaa ja tiedonvälitystä

Erilaisissa informaationkäsittelytehtävissä ollaan enenevässä määrin

siirtymässä rinnakkaisuuden hyväksikäyttöön nopeuden ja tehokkuuden lisäämiseksi. Vastaavasti laajoissa optimointitehtävissä tai laajojen matrisien kääntämisessä mahdollisuus reaaliaikaiseen laskentaan houkuttelee kehittämään algoritmeja, jotka jakavat laskentatehtävän useamman rinnakkaisen prosessorin kesken. Kummassakin sovellutuksessa prosessien välinen kommunikaatioproseduuri muodostaa samantyyppisen ongelman.

Yhä useammin muodostetaan tietoliikenneverkko hajautettuja laskentatehtäviä varten, jolloin verkko kytkee joukon tietokoneita — pieniä tai suuria — yhtenäiseksi laskentajärjestelmäksi. Arkipäivän esimerkki tästä ovat pankkien pääteverkot. Kaapeliverkoston väistämätön yleistymisen tuo tällaiset järjestelmät ajan mittaan myös tavallisen Matti Meikäläisen ulottuville. Meidän laskentatarpeemme saattavat syntyä esim. tietokone-*rahan* käyttöönotosta. Laskennan ja tietoliikenteen läheinen kytkeytyminen on johtanut ehdotuksiin ruveta käyttämään koko kentästä uutta nimeä *komunikaatio*, missä yhdistyvät sanat *komputaatio* ja *komunikaatio*.

### Päätöksenteon mallien konvergenssi

Päätöksenteon ongelmien tutkimuksessa on konvergenssia nähtävissä myös yleisemmin eri tutkimusalueiden suunnilta. Tämä on toisaalta aitoa uusien elementtien mukaanottoa päätösprobleeman ratkaisemiseen ja toisaalta heijastusta siitä tosiasista, että niiden tutkimusalojen lukumäärä, jotka tavalla tai toisella käsittelevät päätöksentekoa, on kovin suuri. Olen tähän asti ollut tarkoituksellisen epämääräinen eri nimitysten suhteen. Jonkinlainen suppea erittely lienee kuitenkin tarpeen, vaikka rajanveto monissa kohdin on hyvin vaikeata ja ehkä aivan turhaa.

*Operaatioanalyysin* nimellä kulkeva matematiikka on keskittynyt resurssien optimaalisen allokoinnin ja erilaisten palvelusysteemien analyysimenetelmien tutkimukseen. Alan kulta-aika oli 50- ja 60-luku. Matemaattisesti probleemmat ovat yleensä staattisia optimointitehtäviä ja satunaisilmiöitä tarkasteltaessa stokastisia prosesseja. Talous- ja johtamistieteiden puolella vastaavasta alueesta käytetään nimitystä *management*

science. Eräs operaatioanalyysin ajankohtaisista tutkimuskohteista on viime vuosina ollut yhden päätöksentekijän usean tavoitteen tehtävät. Erilaisia ratkaisuvaihtoehtoja haettaessa on varsinaisen matematiikan lisäksi suurta huomiota kiinnitetty keinoihin käyttää hyväksi erilaisia vuorovaikutusmuotoja itse päättäjän kanssa. Tämä lähestymistapa on ollut hedelmällinen ja tuloksena on ollut monia käytännön kannalta erittäin lupaavia tekniikoita.

*Peliteoria*, joka on pääkohdiltaan monen päättäjän ja monen kriteerin optimointia, syntyi 40-luvun lopulla lähinnä matemaattisen taloustieteen kentässä. Sitä on harrastettu sittemmin sekä operaatiotutkijoiden että matemaattisen taloustieteilijöiden toimesta. Alueena se on aina viime vuosiin asti pysynyt melko lailla käytännölle vieraana. On hieman yllättävää todeta, että toistaiseksi vain harvat edellä viittaamistani uusista monikriteeritekniikoista perustuvat matemaattisen peliteorian tulosten hyödyntämiseen. Niissä on useinkin pelien teoria korvattu käytännön vuorovaikutuksellisella pelaamisella.

*Säätö- ja systeemitheoria* on keskittynyt dynaamisten ajan mukana kehittyvien järjestelmien ohjaamiseen. Perinteisenä pääongelmana on ollut stabiloivien säätäjien suunnittelu teknisille prosesseille. Kun optimiohjaustehtävässä on useita kriteereitä ja päättäjiä syntyy ns. *differentiaalipelitehtävä*. Differentiaalipelien tutkimus saavutti laajat mitat vasta 70-luvulla. Siihen liittyvä teoria on toistaiseksi keskittynyt dynamiikan ja informaation vuorovaikutuksen tuottamiin ongelmiin. Kyseessä on lähes täysin eri matematiikka kuin klassillisessa peliteoriassa.

*Systeemianalyysiksi* on alettu kutsua laajaa kokonaisuutta, joka saadaan kun yhdistetään operaatioanalyysin optimointitekniikat ja säätöteorian dynaamiset mallit sekä laajennetaan sovellutukset tekniikasta ja taloudesta aina biologiaan asti. *Kybernetiikka* on käytöstä poistumassa oleva termi, joka tarkoittaa lähes samaa aluetta.

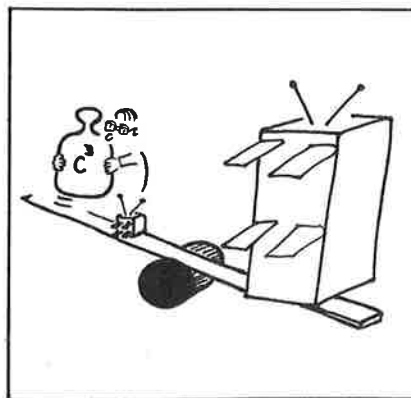
*Taloustieteessä* ollaan kiinnostuneita siitä miten organisaatiot ja yksilöt saadaan toimimaan tehokkaalla tavalla. Tähän liittyy *joukkue-teorian ja kannustimien tai insenttiivien teorian* kehitys. Joukkue-teoria tutkii yhden kriteerin optimointia monen erilaista tietoa omaavan päät-

täjän toimesta. Kannustimien teoriassa taas on kyse metodeista, joilla valvoja antamansa lisäinformaation avulla saa valvottavan, optimointikriteerin muistuttamaan enemmän valvojan omaa optimointikriteeriä. Kannustamalla tai toisin sanoen uhkaamalla valvoja saa valvottavan, joka voi yleisesti olla teollisuudenala tai vaikka yksityinen henkilö, omatehoisesti toimimaan haluamallaan tavalla. Esimerkiksi sähkötariffissa on kannustimena yösähkön alempi hinta. Se saa kuluttajan optimin siirtymään kokonaisuuden kannalta edulliseen suuntaan.

Näiden hyvin erilaisista sovellutusalueista lähteneiden tutkimusalojen kesken on nyt näkyvissä konvergenssia. Aivaa uusimmissa alueen julkaisuissa yhdistyvät taloustieteen joukkue- ja kannustimien teorit, matemaattikkojen peliteoria ja insinöörien dynaaminen ohjausteoria. Tämä pyrkimys synteisiin luo pohjaa uuden yleisen ohjaamisen ja päätöksenteon teoriajärjestelmän synnylle. Uudessa metodikassa tulee vielä pitkään riittämään sovellutusiltaan tärkeitä ja kiehtovan vaikeita tutkimusongelmia. Kyseessä on epäilyksettä eräs systeemitekniikan tutkimuksen ajankohtaisista painopistealoista.

### Insinöörin päätösongelmat

Minkälaisia ovat sitten tyypilliset insinöörin päätöksenteko-ongelmat? Heti alkuun on voimakkaasti korostettava sitä usein unohdettua tosiasiaa, että *suunnittelu on päätöksentekoa* eli vaihtoehtojen valintaa rajoitusten vallitessa. Insinöörin tehtävät ovat lähes aina jonkinlaista suunnittelua oli kohteena sitten nosturi, sähköpiiri tai puunjalostuskombinaatti. Insinöörin on suunnittelussa tähdittävä optimiin koska kilpailukykyisiltä tuotteilta ja tuotantolaitoksilta edellytetään — optimaali-



suutta. Esimerkiksi materiaalikäytön minimointiin on päätöksenteon matematiikalla tarjottavana monta klassillista tekniikkaa. Materiaalikus-tannusten minimointi on selväpiirteistä optimointia. Tehtävä muuttuu kuitenkin hyvin helposti monimutkaisemmaksi, kun mukaan otetaan toinen edellisen kanssa periaatteessa yhteismitaton suunnittelukriteeri kuten teknillinen suorituskyky, työturvallisuus tai luotettavuus. Sodankäyntianalogioihin palaten on taas helppo nähdä, että yleisesti tehtaan tuotannon ja henkilöstön johtaminen muodostaa periaatteessa alussa kuvaamani  $C^3$ -päättösystemin vastaavine ongelmineen.

### Ympäristö, energia ja luonnonvarat

Erittäin tärkeitä monen kriteerin ja monen päätöksentekijän ongelmia on viime vuosina syntynyt ympäristöky-symysten tultua ajankohtaisiksi. Tehtaan johdossa olevat insinöörit joutuvat päättämään prosessin toimintaoptimin ja ympäristöpäästöjen suhteesta. Valvontaviranomaisen tehtävä on vastaavasti pohjimmiltaan se, minkälaisella säännöstöllä saadaan tehdas kannustettua itse valitsemaan yhteiskunnan kannalta toivottavin tuotanto- ja päästötaso. Ehkä selvimmin tavallisia kansalaisia koskettaneita monikriteerisiä päätöksentekoprobelempia ovat olleet viime vuosien joki- ja vesistöjärjestelyt. Teoreettisesti ei ole olemassa yhtä ainutta oikeaa energiahyödyt ja ympäristöhaitat optimoivaa ratkaisua, mutta jälleen on olemassa matemaattisia metodeja ainakin kaikkien kannalta huonojen ratkaisujen poissul-kemiseksi.

Vesistöt ovat osa luonnonvaroja. Maailmanlaajuisesti on luonnonvarojen hyödyntämisen matemaattiset mallit ja optimointi noussut tärkeäksi tutkimuskohteeksi. Alkaen luonnonvarojen etsinnän optimoinnista ja päätyen kysymykseen siitä minkälainen hyödyntämishjelma olisi pitkällä aikavälillä järkevin. Tässä yhteydessä on mielenkiintoista jälleen todeta kytkentä informaatiotekniikkaan. Luonnonvarojen kartoituksessa ja etsinnässä ovat satelliitit saavuttaneet tärkeän aseman. Satelliittien välittämän informaatiokäsittelyn matemaattisten algoritmien parantaminen on osa etsinnän optimointia.

Energiatalouden ja -varojen kysy-

mykset ovat mitä keskeisimpiä nyky-yhteiskunnassa. Energiapolitiittisen suunnittelun tukena on meilläkin jo pitkään käytetty matemaattisia ennakointi- ja optimointimalleja. Vaikka matemaattiset mallit eivät ennusta poliittisia energiakriisejä, niin siitä huolimatta meidän on pakko tukeutua niihin. Onkin nähtävissä, että päätöksenteon matematiikan osuus energiateknisessä ja -poliittisessa tutkimuksessa on vielä selvästi kasvussa.

Tekniikassa ja taloudessa jouduutaan monen muunkin kysymyksen kuin energiankäytön yhteydessä selvittämään tulevaisuuden kehitysvaihtoehtoja. Kyseessä voi olla esimerkiksi uuden tekniikan seurausvaikutusten arviointi tai yrityksen pitkän tähtäyksen suunnittelu. Tätä probleemakenttää on viime aikoina ruvettu kutsumaan *tulevaisuudentutkimukseksi*. Kyseessä on insinöörejäkin koskettavasta tieteidenvälisestä tutkimuskentästä, jonka metodiikan eräs osa ovat matemaattiset päätöksenteon tekniikat.

Malleihin ei pidä uskoa sokeasti. Malli on hyvä renki, mutta huono isäntä. Akateemista tutkijaa on aika ajoittain syytä varoittaa malli- ja tiedeidealismiin tuudittautumisesta. Päätöksenteko on kuitenkin useimmiten politiikkaa ja niinsanotun hyvän päätöksen syntymisen esteenä ei tarvitse olla tuntematon tulevaisuus tai mallin puuttuminen vaan se, että kyseinen optimaalinen päätös on jonkin tahon peiteltyjen tavoitteiden vastainen.

### Päätöksenteko ja systeemijattelun opetus

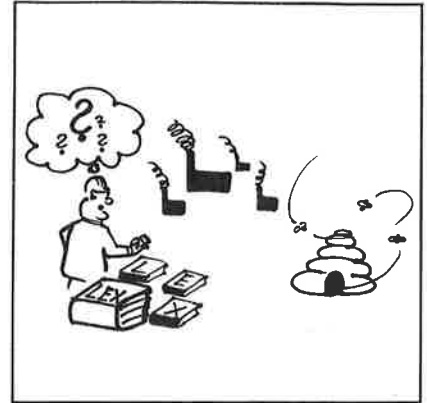
Mitä insinöörin päätöksenteon matematiikka sitten konkreettisesti on ja mitä uusia vaatimuksia se asettaa koulutukselle? Päätöksentekokriteerit muodostavat yleensä aina jonkinlaisen optimointitehtävän, mutta kriteerin lisäksi tarvitaan lähes aina matemaattinen malli kohdesysteemistä; jaettavista resursseista tai toimintaympäristöstä, missä päätöstä tehdään. Laajan kokonaisuuden käsittely vaatii systeemitarkastelutapaa, missä ensin analysoidaan osalohkojen mallit ja osien vuorovaikutukset ja kootaan tätä kautta kuva kokonaisuudesta. Periaatteessa matemaattisten mallien käyttö ei enää 80-luvulla pitäisi olla mikään uusi ja eksotinen asia, koska mallien käytön välttä-

mättömyys on todettu jo kauan sitten.

Käytäntö on kuitenkin osoittanut, että mallijattelun soveltaminen on kyllä helppoa systeemitekniikkaan tai matematiikkaan erikoistuneelle insinööriille, mutta monien perinteisten tekniikan alojen insinööreille se on vierasta. Tämä siitäkin huolimatta, että heillä on opiskeluvaiheessa voinut olla kaikki tarvittava matematiikka eri kursseissa. Ei siis riitä, että mallien ja systeemitekniikan vaatimia matematiikan osia käsitellään omilla kursseillaan.

Teknillisessä korkeakoulussa tarvitaan mielestäni sovellutusorientoitunutta mallien tai matemaattisen systeemianalyysin kurssia, joka tulisi sisällyttää useimpien koulutusohjelmien perusosaan. Mallien ja systeemijattelun metodiikan lisäksi olisi monella tekniikan alalla tarve lisätä optimoinnin, stokastiikan ja muun päätöksenteon matematiikan opetusta. Erityisen tärkeitä olisi lisätä tämän aineksen osuutta jatko-opiskelijoiden ohjelmissa, koska matemaattisen systeemimetodiikan käyttö on tullut yhä yleisemmäksi eri tekniikan alojen tutkimusongelmissa.

Toisaalta aiemmin kuvaamani tutkimuksen kehitys vaatii myös koko ajan ajanmukaistamaan ja monipuolistamaan päätöksentekoon erikoistuvien systeemi-insinöörien koulutusta. Muistan hyvin kuinka edeltäjäni ja opettajani professori Olli Lokki korosti sitä, että teknillisessä korkeakoulussa on matematiikan aina oltava yhdistettynä käytännön probleemoihin. Se näkemys, että on tärkeitä kouluttaa matemaattisesti ja systeemiteknisesti orientoituneita erikoisalojen insinöörejä, oli vanhan matematiikkainsinööriohjelman perusta. Tänäkään päivänä emme ole primäärisesti kouluttamassa matemaatikkoja vaan insinöörejä. Se näkyy myös valmistuvien oppilaittemme työhön sijoittumisessa. Kysyntä on niin suuri, ettei laitokselle tahdo riittää omia oppilaita assistenteiksi. Tilanne näyttää siis hyvältä, mutta harmaana pilvenä taivaalla on uusi tutkintosaanto. Se on synnyttämässä niin kiinteitä ohjelmarunkoja jäykkine esitietovaatimuksineen, että päätöksenteon ja muun matematiikan yhdistäminen insinööritutkintoon on käymässä kovin hankalaksi. Näissä oloissa uskon itse matematiikkainsinööriohjelman tärkeyden vain korostuvan. On vain pidettävä huoli, että mahdollisimman monet oppilaistam-



me onnistuvat sovittamaan tutkimoonsa pitkänä ammattiaineena myös jonkin perinteisen insinööriaineen.

### Tulevaisuus

Olen edellä hahmotellut kuvaa tulevaisuuden yleisestä päätöksentekotieteestä. Jos kehitys on nopeata saatamme sen mukaan pian käyttää samoja uusia metodeja suunniteltaessa sähkötariffia, ympäristölainsäädäntöä, prosessinsäätöjärjestelmiä, tietoliikenneverkostoja, energiavarojen hyödyntämistä, yrityksen organisaatiota ja työnohjoitustekniikoita tai analysoitaessa mehiläisyhteiskunnan valtarakenteita. Se, osoittautuuko tämä todeksi vai toiveuneeksi, jää nähtäväksi. □

### KIRJALLISUUTTA

- [1] M. Athans: System theoretic challenges and research opportunities in military C<sup>3</sup> systems. Special session on C<sup>3</sup> systems, 19th IEEE Conference on Decision & Control, Albuquerque 10.12.1980.
- [2] W. I. Boucher (toim.): The study of the future: an agenda for research, National Science Foundation, 1977.
- [3] C. Clark: Mathematical bioeconomics — The optimal management of renewable resources, John Wiley, 1976.
- [4] R. F. Drenick: Large-scale system theory in the 1980's, Large Scale Systems 2, 1981.
- [5] J. R. Green ja J.-J. Laffont: Incentives in public decisionmaking, North-Holland, 1979.
- [6] Y. C. Ho, P. B. Luh ja R. Muralidharan: Information structure, Stackelberg games and incentive controllability, IEEE Trans. Automatic Control, 1981.
- [7] C. L. Hwang ja A. S. M. Masud: Multiple objective decision making methods and applications, Springer, 1979.
- [8] G. Oster ja E. O. Wilson: Caste and ecology in social insects, Princeton Univ. Press, 1978. □ □