

7,8

ODC
311
624.3

FOLIA FORESTALIA 133

METSÄNTUTKIMUSLAITOS • INSTITUTUM FORESTALE FENNIAE • HELSINKI 1971

MATTI PALO

METSÄLLISTEN PROJEKTIN VERKKOSUUNNITTELU

PLANNING FORESTRY PROJECTS BY MEANS OF NETWORK ANALYSIS

- N:ot 1—18 on lueteltu Folia Forestalia-sarjan julkaisuissa 1—41.
 Nos. 1—18 are listed in publications 1—41 of the Folia Forestalia series.
- N:ot 19—55 on lueteltu Folia Forestalia-sarjan julkaisuissa 19—96.
 Nos. 19—55 are listed in publications 19—96 of the Folia Forestalia series.
- 1969 No 56 Terho Huttunen: Länsi-Suomen havusahatukkiin koko ja laatu vuonna 1966.
 The size and quality of coniferous sawlogs in western Finland in 1966. 1,50
- No 57 Metsäntutkimuslaitoksen päätös puutavaran mittauksessa käytettävistä muuntoluvuista ja kuutioimistaulukoista.
 Skogsforskningsinstitutets beslut beträffande omvandlingskoefficienterna och kuberings-tabellerna, som används vid virkesmätning. 28,80
- No 58 Paavo Tiihonen: Puutavaralajitaulukot 2. Maan eteläpuoliskon mänty, kuusi ja koivu.
- No 59 Paavo Tiihonen: Puutavaralajitaulukot 3. Männyn ja kuusen uudet paperipuutaulukot.
- No 60 Paavo Tiihonen: Puutavaralajitaulukot 4. Maan pohjoispuoliskon mänty ja kuusi. 2,—
- No 61 Matti Aitolahti ja Olavi Huikari: Metsäojien konekaivun vaikeusluokitus ja hinnoittelu.
 Classification of digging difficulty and pricing in forest ditching with light excavators.
- No 62 Kullervo Kuusela ja Alli Salovaara: Etelä-Pohjanmaan, Vaasan ja Keski-Pohjanmaan mestävarat vuonna 1968.
 Forest resources in the Forestry Board Districts of Etelä-Pohjanmaa, Vaasa and Keski-Pohjanmaa in 1968. 3,—
- No 63 Arno Uusvaara: Maan ja metsän omistus Suomessa -v. 1965 alussa ja sen kehitys v. 1957—65.
 Land and forest ownerships in Finland 1965 and their development during 1957—65.
- No 64 Timo Kurkela: Haavanruosteeseen esiintymisestä Lapissa.
 Leaf rust on aspen in Finnish Lapland. 1,—
- No 65 Heikki Ravela: Metsärunko-ojien mitoitus.
 Dimensioning of forest main ditches. 1,50
- No 66 Matti Palo: Regression models for estimating solid wood content of roundwood lots.
- No 67 Terho Huttunen: Suomen puunkäyttö, poistuma ja metsätase vuosina 1967—69.
 Wood consumption, total drain and forest balance in Finland in 1967—69. 2,50
- No 68 Lauri Heikinheimo, Seppo Paananen ja Hannu Vehviläinen: Stumpage and contract prices of pulpwood in Norway, Sweden and Finland in the felling seasons 1958/59—1968/69 and 1969/70. 2,50
- No 69 U. Rummukainen ja E. Tanskanen: Vesapistooli ja sen käyttö.
 A new brush-killing tool and its use. 1,—
- No 70 Metsätalastollinen vuosikirja 1968.
 Yearbook of forest statistics 1968. 6,—
- No 71 Paavo Tiihonen: Rinnankorkeuslämpimittaan ja pituuteen perustuvat puutavaralajitaulukot.
- No 72 Olli Makkonen ja Pertti Harstela: Kirves- ja moottorisahakarsinta pinotavaran teossa.
 Delimiting by axe and power saw in making of cordwood. 2,50
- No 73 Pentti Koivulehto: Juurakoiden maasta irrottamisesta.
 On the extraction of stumps and roots. 1,50
- No 74 Pertti Mikkola: Metsähukkapuun osuus hakkuupoistumasta Etelä-Suomessa.
 Proportion of wastewood in the total cut in southern Finland. 1,50
- No 75 Eero Paavilainen: Tutkimuksia ivetyssajakohdan vaikutuksesta nopealiukoisten lannoitteiden aiheuttamiin kasvureaktioihin suometsissä.
 Influence of the time of application of fast-dissolving fertilizers on the response of trees growing on peat. 2,—
- 1970 No 76 Ukko Rummukainen: Tukkimehittäin, Hylobius abietis L., ennakkotorjunnasta taimitarhassa.
 On the prevention of Hylobius abietis L. in the nursery. 1,50
- No 77 Eero Paavilainen: Koetuloksia suopeltojen metsittämisestä.
 Experimental results of the afforestation of swampy fields. 2,—
- No 78 Veikko Koskela: Havaintoja kuusen, männyn, rauduskoivun ja siperialaisen lehtikuusen halla- ja pakkaskuivumisvaurioista Kivisuon metsänlannoituskoekentällä.
 On the occurrence of various frost damages on Norway spruce, Scots pine, silver birch and Siberian larch in the forest fertilization experimental area at Kivisuo. 2,—
- No 79 Olavi Huikari—Pertti Juvonen: Työmenekki metsäojituksessa.
 On the work input in forest draining operations. 1,50
- No 80 Pertti Harstela: Kasausajan ja valtimonlyöntitiheyden sekä tehollisen sahausajan määrittäminen järjestettyjen kokeiden, pulssitutkimuksen ja frekvenssianalyysin avulla.
 Determination of pulse repetition frequency and effective sawing time with set tests pulse study and frequency analysis. 1,50
- No 81 Sulo Väänänen: Yksityismetsien kantohinnat hakkuuvuonna 1968—69.
 Stumpage prices in private forests during cutting season 1968—69. 1,—
- No 82 Olavi Huuri, Kaarlo Kytökorpi, Matti Leikola, Jyrki Raulo ja Pentti K. Räsänen: Tutkimuksia taimityppiluokituksen laatimista varten. I Vuonna 1967 metsänviljelyyn käytettyjen taimien morfologiset ominaisuudet.
 Investigations on the basis for grading nursery stock. I The morphological characteristics of seedlings used for planting in the year 1967. 1,50

Matti Palo

METSÄLLISTEN PROJEKTtien VERKKOSUUNNITTELU

Planning forestry projects by means of network analysis

(English contents and summary, see pp. 3 and 47)

ESIPUHE

Metsätaloudessa on suunnittelulla vanhat perinteet. Pääasiassa on kiinnostuksen kohteena ollut kuitenkin puun kasvatukseen liittyvä pitkän tähtäyksen suunnittelu. Monien eri tekijöiden vuoksi on erilaisten metsätöiden lyhyen tähtäyksen suunnittelu tullut viime aikoina entistä ajankohtaisemmaksi. Metsäntutkimuslaitoksessa on tunnettu tämän alan menetelmäkehittelyn tarvetta. Tämän seurauksena on syntynyt käsillä oleva tutkimus.

Verkkosuunnittelumenetelmät ovat viime aikoina tulleet monilla aloilla paljon käytetyiksi projektien johtamisessa. Tässä kartoitetaan verkkosuunnittelun sisältöä ja sovellutusnäkyviä metsällisten projektien suunnittelun näkökulmasta. Tämä tutkimus on ollut vireillä vuodesta 1966 lähtien. Eräiden kiireisempien tehtävien

tultua suoritetuksi saatiin myös tämä tutkimus viimeistellyksi.

LAURI VAARA ja MATTI UOTINEN Keskusmetsälautakunta Tapion Kemijärven metsänparannuspiiristä sekä EINO RITARI Kymin Osakeyhtiön Nynäsin taimitarhalta toimivat asiantuntijoina tutkimuksen käytännön sovel-lutusesimerkkien laadinnassa. HANNU VÄLI-AHO, KLAUS RANTAPUU ja OLLI NISSILÄ lukivat kriittisesti käsikirjoituksen. Kuvat ovat OLLI SAASTAMOISEN ja MAIJA-LIISA SOVERIN puhtaaksi piirtämiä. LAURA COLLIANDER suoritti konekirjoitustyön. PEITSA HIRVONEN ja DAVID COPE tarkistivat tiivistelmän englannin kielen käännöksen. Parhaat kiitokset.

Helsingissä joulukuussa 1971

Lauri Heikinheimo

Matti Palo

SISÄLLYSLUETTELO

0. TIIVISTELMÄ	4
1. JOHDANTO	5
11. Suunnitteluteoreettinen lähtökohta	5
12. Verkkosuunnittelun aikaisemmat metsälliset sovellutukset	6
13. Tutkimusongelma	6
2. VERKKOSUUNNITTELUMENETELMÄT	9
21. Toimintaverkko	9
211. Nuoliverkko	9
212. Lohkoverkko	11
22. Aikakäsitteet	12
221. Kriittinen polku	12
222. Laskennalliset käsitteet	12
23. Aika-analyysi	14
231. Pelivaran laskenta	14
232. Matriisimenetelmä	15
233. Tilastollinen menetelmä	17
24. Kustannusanalyysi	19
241. Käsitteet ja tavoitteet	19
242. Kustannusfunktiot	20
243. Kustannusten minimointi	21
2431. ”Heuristinen” menetelmä	21
2432. CPM-menetelmä	23
2433. Kokonaiskustannusten minimointi	23
244. Ohjelmointimenetelmien sovellutus	23
2441. Kriittisen polun etsintä	23
2442. Panoskustannusten minimointi	25
2443. Verkkovirtamenetelmä	26
25. Resurssianalyysi	27
26. Tietokonelaskenta	29
3. VERKKOSUUNNITTELUN METSÄLLISET SOVELLUTUSNÄKYMÄT	31
31. Metsänviljely- ja taimitarhaprojektit	31
32. Puun korjuuprojektit	36
321. Verkkosuunnittelun lähtökohta	36
322. Korjuuprojektien verkkosuunnittelu	37
323. Kehittämisenäkymät	42
33. Metsätieprojektit	43
4. TULOSTEN TARKASTELU	45
VIITTEET	46
SUMMARY	47

CONTENTS

0. SUMMARY IN FINNISH	4
1. INTRODUCTION	5
11. Planning-theory framework	5
12. Earlier forestry applications of network analysis	6
13. Problem definition	6
2. NETWORK PLANNING METHODS	9
21. Network	9
211. Arrow network	9
212. Block network	11
22. Time terminology	12
221. Critical path	12
222. Computation terminology	12
23. Time analysis	14
231. Computation of float (slack)	14
232. Matrix method	15
233. Statistical method	17
24. Cost analysis	19
241. Terminology and goals	19
242. Cost functions	20
243. Cost minimization	21
2431. "Heuristic" method	21
2432. Critical Path Method	23
2433. Minimization of total costs	23
244. Application of programming methods	23
2441. Determination of critical path	23
2442. Minimization of resource costs	25
2443. Network flow method	26
25. Resource analysis	27
26. Usefulness of a computer	29
3. FORESTRY APPLICATIONS OF NETWORK-PLANNING METHODS	31
31. Tree planting and nursery projects	31
32. Logging projects	36
321. Frame of network planning	36
322. Network planning of logging projects	37
323. Future lines of development	42
33. Forest-road projects	43
4. DISCUSSION	45
REFERENCES	46
SUMMARY IN ENGLISH	47

O. TIIVISTELMÄ

Projektilla eli hankkeella tarkoitetaan kerta-luonteista toisiinsa kytkettyjen tehtävien kokonaisuu- tta, jonka toteuttamisella aikaansaadaan tavoiteltu tulos. Projektille on tunnusomaista, että sen toteuttamista ei voida toistaa täsmäl- leen samalla tavalla, kuten esim. tuotteiden val- mistamista jatkuvassa tehdastuotannossa. Jatku- van tuotannon ja projektin periaatteellinen ero esiintyy selkeänä nimenomaan suunnittelussa.

Jatkuvan tuotannon eri vaiheiden vaatima aika, kustannukset ja resurssit tunnetaan yleensä tarkkoina kokemuskokemuksina. Projektin suunnittelija yrittää myös käyttää hyväksi samanta- paisten projektien toteutuksesta aikaisemmin saatuja kokemuksia. Koska kuitenkin kukin projekti on aina yksilöllinen ja ainutkertainen, täy- tyy suunnittelijan kustannus- ja aikatauluarviois- saan täydentää kokemuskokemuksia omaan harkinta- taansa nojautuen. Projektien toteutuksen eri vai- heissa on jo etukäteen odotettavissa lähinnä tekni- sten ja sääolosuhteiden muutoksista aiheutu- vien kustannus- ja aikatauluarviokeamien esiin- tymistä. Projektin suunnittelijan tulee siis kyetä sen toteutuksen kuluessa jatkuvaan jo tehtyjen suunnitelmien tarkistukseen ja uudelleen suunnitteluun. Tyypillisiä projekteja ovat esimerkiksi talon- ja sillanrakentaminen, paperikoneen val- mistus jne.

Suuren ja keskisuuren metsällisen yrityksen toiminnoille on ominaista, että ne tapahtuvat useimmiten kymmenillä tai sadoilla laajoille alueille hajaantuneilla eri työmailla osittain sama- aikaisesti ja osittain peräkkäin. Työmaat ja- kaantuvat ominaisuuksiensa puolesta useisiin ryhmiin (esimerkiksi työvaikeusluokkiin ja met- sätyyppeihin), joista kullekin täytyy soveltaa samankin työläjien puitteissa erilaisia kustannuk- sia ja suoritusajkoja vaativia menetelmiä ja koneita. Metsätyöt suoritetaan lähes poikkeukset- ta ulkoilmassa, joten sääolosuhteiden kehitty- minen vaikuttaa huomattavasti työtuloksiin. Kaikki nämä tekijät yhdessä aiheuttavat sen, että erilaiset metsälliset työt muistuttavat enem- män kertaluonteisia projekteja kuin jatkuvaa tehdastuotantoa (sarja- ja prosessituotantoa). Metsällisten projektien suunnittelu ja toteutuk- sen seuranta on monien epävarmuustekijöiden

vuoksi vaikeaa ja vaatii siksi juuri vastaavia olo- suhteita varten kehitettyjen menetelmien sovel- tamista.

Tämän tutkimuksen tarkoituksena on: (1) yhdistellä ja kuvata metsällisten projektien suunnitteluun soveltuva verkkosuunnittelume- netelmää sekä (2) esittää eräitä kehitetyn mene- telmän alustavia metsällisiä sovellutuksia ja ar- vioita niiden kehittämissuuntia.

Projektista laadittu toimintaverkko muodos- taa verkkosuunnittelun perustan. Toimintaverk- koa voidaan pitää projektin graafisena systeemi- mallina. Se on looginen malli, joka kuvaa pro- jektiin kuuluvien eri tehtävien keskinäiset riip- puvuussuhteet ja selvittää siten hankkeen to- teutuksen kulun sen alkutapahtumasta loppu- tapahtumaan.

Verkkosuunnittelun menestyksellinen käyttö vaatii tekijältään hyvää projektin tuotantotek- nologian asiantuntemusta. Yleisintä lieneekin toimintaverkkojen laadinta ryhmätyönä. Verk- kosuunnittelumenetelmän käyttöönotto vaatii henkilöstön koulutusta, suunnitteluajan lisää- mistä ja tietokone-laskentaa. Näistä ja vastaavista muista tekijöistä muodostuvat verkkosuunnitte- lun kustannukset. Menetelmän käyttöönottoa harkittaessa on sen mukanaan tuomat lisäkus- tannukset arvioitava ja verrattava niitä mene- telmällä saavutettavissa olevaan hyötyyn.

Toimintaverkkojen laatimissäännöt ovat yk- sinkertaisia. Myöskään aikalaskelmien teko il- man tietokoneita ei pienissä projekteissa ole kovin suuritöistä. Projektin analysointi verkkome- netelmiä käyttäen vaatii kuitenkin alkeistekniikan lisäksi hyvää projektikentän yleistuntemus- ta. Suunnittelijoiden koulutus ja suurten projek- tien työryhmien koordinointi muodostaa siten keskeisen ongelman. Suunnittelupäällikön tulee tarkoin tuntea verkkosuunnittelun eri so- vellutusmahdollisuudet ja menetelmän rajoituk- set. Tämä tekee mahdolliseksi tavoitteiden ja niiden toteutumiskriteerien kullekin suunnitte- lutilanteelle tarkoituksenmukaisen täsmennyk- sen. Näillä edellytyksillä voidaan verkkosuun- nitelua suosittaa harkittavaksi myös metsällis- ten projektien suunnitteluun.

Mitä monitahoisempi ja aikasidonnaisempi

suunnittelun kohteena oleva metsällinen projekti on, sitä suurempi hyöty verkkosuunnittelun soveltamisesta on odotettavissa. Tämän tutkimuksen yhteydessä ei ole tullut esiin näkökohtia, jotka olisivat ristiriidassa tutkimusongelman asettelussa esitettyjen verkkosuunnittelun etuja koskeneiden hypoteesien kanssa.

Yksinkertaisinta verkkosuunnittelua voidaan suositella metsänviljely-, taimitarha- ja metsätie-

projektien suunnitteluun. Sen sijaan puun korjuuprojekteissa olisi tarkoituksenmukaista edetä myös edistyneempien verkkosuunnittelumenetelmien käyttöön. Tämä vaatii kuitenkin vielä lisää tutkimus- ja kehittämistyötä sekä verkkosuunnittelumenetelmän sopeuttamista yrityksen budjetointi- ja muuhun suunnittelujärjestelmään.

1. JOHDANTO

11. Suunnitteluteoreettinen lähtökohta

Tässä tutkimuksessa rajoitetaan yrityksen metsällisten projektien suunnitteluongelman käsittelyyn. Lähtökohtana voidaan tällöin pitää yrityksen ohjausjärjestelmän kehysmallia (PALO 1971b, luku 23). Ohjausjärjestelmä on jaettu siinä edelleen tavoite-, päätäntä- ja tietojärjestelmiin. Tässä mallissa voidaan suunnittelua pitää päätäntäsystemin alijärjestelmänä (PALO 1971a, 24). Suunnittelun tarkoituksena on siis valmistella ja helpottaa varsinaista päätöksentekoa ja sitä kautta tehostaa yrityksen toiminnan ohjausta.

Yrityksen tietojärjestelmä syöttää suunnittelusysteemiin informaatiota ja tavoitejärjestelmä tavoitteita. Suunnittelu tuottaa suunnitelmia, jotka ovat luonteeltaan niiden kuvauskohteiden todellisuuden systeemien yksinkertaistettuja malleja. Suunnitelmat kohdistuvat tulevaisuuteen ja sisältävät siksi aina vaihtelevan määrän epävarmuutta. Epävarmuuden aste määräytyy suunnittelun kohteen, suunnitteluhorisontin, informaation ja suunnittelumenetelmien laadun ym. tekijöiden perusteella. (Vrt. MALMBORG 3–4.)

Suunnittelutilanteen kuvauksessa on yleinen systeemikäsitteistö (esim. PALO 1971b, luku 22) käyttökelpoinen. Sen mukaisesti määritellään suunnittelun kohde järjestelmänä. Siihen otetaan mukaan kaikki alkioit, niiden tilat sekä alkioiden ja tilojen väliset riippuvuussuhteet, jotka ovat asetettujen tavoitteiden toteutuksen kannalta olennaisia ja joihin voidaan yrityksen ohjausjärjestelmän avulla huomattavasti vaikuttaa. Suunnittelun kohteen ympäristö muodos-

tuu puolestaan alkioista, tiloista ja riippuvuus-suhteista, joiden muutos vaikuttaa olennaisesti suunnittelun kohdejärjestelmän toimintaan tai joihin em. järjestelmän tilan muutos olennaisesti vaikuttaa. Lisäehtona suunnittelun ympäristölle on, että sen osat eivät ole yrityksen ohjausjärjestelmän ohjattavissa.

Suunnittelun kohdejärjestelmän ja sen ympäristön täsmentäminen määrittelee suunnittelutilanteen. Kohdejärjestelmään sisältyy yleensä seuraavat alkioit: (1) suunnittelun fyysinen kohde (esim. tietty metsäalue), (2) suunnittelutehtävien laajuus (esim. rahoitusnäkökohtien mukaanottaminen tai poisjättäminen), (3) aikahorisontin pituus, (4) päätöksentekijät, (5) tavoitteet ja niiden toteutumisen vertailukriteerit, (6) resurssit ja muut rajoitukset. (Vrt. MALMBORG 5–6.)

Edellisen luettelon pohjalta voidaan alustavasti rajoittaa tämän tutkimuksen aihepiiriä. Suunnittelun fyysinen kohde voi olla mikä tahansa metsällisen yrityksen projektiluonteinen tehtäväkokonaisuus. Jos suunnittelu jaetaan vaihtoehtolaskelmiin ja tavoitelaskelmiin (budjetit ja standardit), rajoitetaan tässä lähinnä ensimmäiseen ryhmään. Projektin suunnittelussa ja seurannassa ollaan ensisijaisesti kiinnostuneita aikataulujen laadinnasta ja toissijaisesti resurssien ja kustannusten käytön säätelystä.

Suunnittelun aikahorisontti jaetaan usein suunnitelmahorisonttiin ja kiinnostushorisonttiin. Tällöin edellisellä tarkoitetaan suunnitelman todellista aikaulottuvuutta ja jälkimmäisellä sen aikavälin pituutta, joka yleensä suunnitelmaa laadittaessa korkeintaan otetaan huomioon. Suunnitelmahorisontin pituus rajoitetaan tässä noin yhdestä kuukaudesta noin yh-

teen vuoteen ja kiinnostushorisontti korkeintaan muutama vuoteen.

Päätöksentekijöiden, resurssien ja menetelmävaihtoehtojen suhteen ei aseteta rajoituksia. Tavoitteet ja niiden toteutuksen vertailukriteerit katsotaan annetuiksi.

12. Verkkosuunnittelun aikaisemmat metsälliset sovellutukset

Verkkosuunnittelulla tarkoitetaan tässä tutkimuksessa PERT- (Program Evaluation and Review Technique) ja CPM- (Critical Path Method) menetelmiä ja niiden johdannaisia. Molemmilla menetelmillä on sama pääperiaate, jota voidaan kutsua kriittisen polun verkkosuunnittelumenetelmäksi.

Verkkosuunnittelumenetelmien pääsuunnat kehitettiin USA:ssa 1950-luvun lopulla. Niitä alettiin välittömästi soveltaa tutkimus- ja kehittämissuunnitelmien ja erilaisten rakennusprojektien ja vastaavien hankkeiden suunnitteluun ja seurantaan. Verkkosuunnittelumenetelmät ovat nykyisin laajassa käytössä useissa maissa.

Verkkosuunnittelua on eräissä maissa sovellettu myös metsällisiin projekteihin. Suomessa on todettu verkkosuunnittelumenetelmien soveltuvan metsien inventointi- ja yleensä metsätutkimusprojektien suunnitteluun ja seurantaan (KUUSELA; PALO 1967 ja 1971a). PERT-menetelmää sovellettiin Norjassa Glomman alueen puunkuljetusjärjestelmän kehittämistutkimuksen suunnitteluun (BJÖRNSTAD). Washingtonin osavaltion luonnonvarainhallinnossa on CPM-menetelmällä ajoitettu leimikoiden valmisteluun ja myyntitarjousten laadintaan liittyviä hankkeita sekä leirintäalueiden rakentamisprojekteja (DAVIS, SCHUYLER S.). Sveitsin metsäviranomaiset ovat soveltaneet CPM-menetelmää lumivyöryjen torjuntaan tarkoitettujen rakennushankkeiden suunnittelussa (BITTIG & PFISTER).

Ehkä edistyneimmät verkkosuunnittelun metsälliset sovellutukset on tehty Tšekkoslovakiassa ja FAO:ssa. Edellisessä tapauksessa oli ongelmana puunkorjuun suunnittelu. Kehitetty CPM-menetelmän, Ganttin janadiagrammin ja lineaarisen ohjelmoinnin yhdistelmä osoittautui tehokkaaksi menetelmäksi puunkorjuun ajoituksen, resurssien suuntaamisen ja kustannusten optimoimiseksi. (NOVOTNY.) FAO:ssa on tutkittu verkkosuunnittelun käyttömahdollisuuksia kansainvälisissä metsällisissä kehitysprojek-

teissa. Siinä yhteydessä on erityisesti korostettu, että verkkosuunnittelu muodostaa vain osan projektien johtamismenetelmistä, joten koko projektin tavoitteet ja verkkosuunnittelun osuus niiden toteutuksessa tulee aina huolellisesti määrittellä. (HUSCH.)

13. Tutkimusongelma

Perinteisessä suomalaisessa metsätaloudessa työt oli rytmitetty vuodenaikojen mukaan. Sekä puun että työvoiman tarjonta oli runsasta. Tämän seurauksena kantohinnat ja työpalkat olivat suhteellisen alhaiset. Metsätalouden kone- ja yleensä pääomakustannukset olivat vähäisiä. Puun kulku kannolta käyttöpaikalle oli verkaista. Metsä uudistettiin valtaosin luontaisesti. Vain muutamia suhteellisen yksinkertaisia työmenetelmiä oli käytössä. Näissä olosuhteissa aikataulujen ja muiden lyhytjaksoisten suunnitelmien tarve oli vähäistä ja niiden laatiminen rutiinomaista.

Edellä kuvailtu tilanne alkoi nopeasti muuttua 1950-luvun lopulta lähtien. Nykyään on metsätoille luonteenomaista erilaisten koneiden runsaus ja pääomakustannusten merkityksen kasvu. Puun tarjonta on myös aikaisempaan verrattuna niukkaa. Monien uusien metsäkoneiden markkinoille tulo on lisännyt myös vaihtoehtojen lukumäärää (esim. puunkorjuuketjut) eri metsätöiden toteuttamisessa. Siirtyminen uitosta maakuljetuksiin on nopeuttanut puun kulkua metsästä käyttöpaikoille.

Työvoiman tarjonnan väheneminen, sen koulutustarpeen kasvu ja konekustannusten kohoaminen ovat kaukokuljetuksen muutoksen ohessa vaikuttaneet metsätöiden kausiluonteisuuden tasoittumiseen. Metsänhoito- ja metsänparannustöiden kasvu on tukenut tätä kehitystä. Lisäksi tehtaiden puuvarastot ovat pienentyneet.

Kaikki edellä esitetyt näkökohdat ovat huomattavasti lisänneet metsätöiden suunnittelun tarvetta. Vaihtoehtoisten menetelmien lisääntyminen on myös vaikeuttanut suunnittelua. Töiden rytmitys siten, että kalliiden koneiden kapasiteetin käyttöaste tulisi sopivan korkeaksi, vaatii myös entistä tarkempien aikataulujen laadintaa. Samaa suuntaa vaikuttaa tehtaiden puuvarastojen suuruuden optimointipyrkimys. *Metsätöiden suunnittelussa tarvitaan siis nyky-*

sin menetelmiä, jotka mahdollistavat useiden vaihtoehtojen edullisuusvertailut sekä myös niiden aikataulujen laadinnan ja toteutuksen seurannan. (Vrt. esim. LINDGREN ym. 5–11.)

Projektilla eli hankkeella tarkoitetaan kerta-luonteista toisiinsa kytkettyjen tehtävien kokonaisuutta, jonka toteuttamisella aikaansaadaan tavoiteltu tulos. Projektille on tunnusomaista, että sen toteuttamista ei voida toistaa täsmälleen samalla tavalla, kuten esim. tuotteiden valmistamista jatkuvassa tehdastuotannossa. Jatkuvan tuotannon ja projektin ero esiintyy selkeänä nimenomaan suunnittelussa. Jatkuvan tuotannon eri vaiheiden vaatima aika, kustannukset ja panokset tunnetaan yleensä tarkkoina kokemuslukuina.

Projektin suunnittelija yrittää myös käyttää hyväksi samantapaisten projektien toteutuksesta aikaisemmin saatuja kokemuksia. Koska kuitenkin kukin projekti on aina yksilöllinen ja ainutkertainen, täytyy suunnittelijan kustannus- ja aikatauluarvioissaan täydentää kokemuslukuja omaan harkintaansa nojautuen. Projektien toteutuksen eri vaiheissa on jo etukäteen odotettavissa lähinnä teknisten ja sääolosuhteiden muutoksista aiheutuvien kustannus- ja aikataulupoikkeamien esiintymistä. Projektin suunnittelijan tulee siis kyetä sen toteutuksen kuluessa jatkuvaan jo tehtyjen suunnitelmien tarkistukseen ja uudelleen suunnitteluun. Tyyppillisiä projekteja ovat esimerkiksi talon- ja sillanrakentaminen, paperikoneen valmistus jne. (Vrt. MODER ym. 1.)

Teollisuuden tuotantokoneet ovat yleensä pysyvästi paikoilleen kiinnitettyjä ja raaka-aine siirretään koneisiin ja valmiit tuotteet koneista varastoihin ja niistä edelleen kulutus- ja käyttöpaikoille. Puun kasvatus voidaan nähdä edellä kuvatun tapaisena tuotantona. Tuotantokoneina toimii tällöin maaperä, ilmakehä ja vesi ”lisä-aineineen”. Tällaista asemapaikkaansa ankkuroitua biologista tuotantokoneistoa syötetään puiden siemenillä ja taimilla sekä lannoitteilla. Tuotokseksi saadaan erilaisiin tarkoituksiin soveltuvaa puuta. Toisaalta kuitenkin esimerkiksi leimikko on puun korjuun raaka-ainetta. Korjuussa täytyy koneet siirtää raaka-aineen luo ennenkuin tuotanto voi alkaa. Puun korjuussa syntyvät tuotteet kuljetetaan käyttöpaikoilleen. Metsänhoitotöissä on tilanne päinvastainen. Esimerkiksi metsänistutuksessa raaka-aine (taimet) ja koneet siirretään tuotantopaikalle (kasvupaikalle) ja valmis tuote jää siihen.

Suuren ja keski-suuren metsällisen yrityksen toiminnoille on ominaista, että ne tapahtuvat useimmiten kymmenillä tai sadoilla laajoille alueille hajaantuneilla eri työmailla joko samanaikaisesti tai peräkkäin. Työmaat jakaantuvat ominaisuuksiensa puolesta useisiin ryhmiin (esimerkiksi työvaikeusluokkiin ja metsätyyppeihin), joista kullekin täytyy soveltaa samankin työläjien puitteissa erilaisia kustannuksia ja suoritusajkoja vaativia menetelmiä ja koneita. Työmaat sijaitsevat yleensä kaukana työntekijöiden kodeista ja vaihtuvat aika ajoin. Tästä aiheutuu työnantajalle usein joko työntekijöiden tilapäisen majoituksen tai heidän jatkuvan töihin kuljetuksen järjestelyjä. Koneiden siirto työmaalta toiselle lisää aikataulussa pysymisen epävarmuutta ja vaikeuttaa huoltoa. Metsätyöt suoritetaan lähes poikkeuksetta ulkoilmassa, joten sääolosuhteiden kehittyminen vaikuttaa huomattavasti työtuloksiin. Kaikki nämä tekijät yhdessä aiheuttavat sen, että erilaiset metsälliset työt muistuttavat enemmän kertaluonteisia projekteja kuin jatkuvaa tehdastuotantoa (sarja- ja prosessituotantoa). *Metsällisten projektien suunnittelu ja toteutuksen seuranta on monien epävarmuustekijöiden vuoksi vaikeaa ja vaatii siksi juuri vastaavia olosuhteita varten kehitettyjen menetelmien soveltamista.* (Vrt. NOVOTNY 95.)

Verkkosuunnittelumenetelmillä pyritään projektien keskeisten muuttujien ajan, kustannusten ja resurssien (työvoima, koneet ja aineet) käytön optimaaliseen säätelyyn. Suunnittelun lähtökohtana on, että projektin koko ja laatu eli siis suorit määrä on etukäteen vahvistettu. Tarkastelu kohdistuu siis näin määritellyn projektin eri toimintojen säätelyyn ”aika-akselilla”. Tässä pyrkimyksessä on käytännössä saavutettu aiemmin käytettyihin menetelmiin nähden seuraavia etuja (MODER ym. 5–6; SHAFFER ym. 185–186; KARLSSON 105):

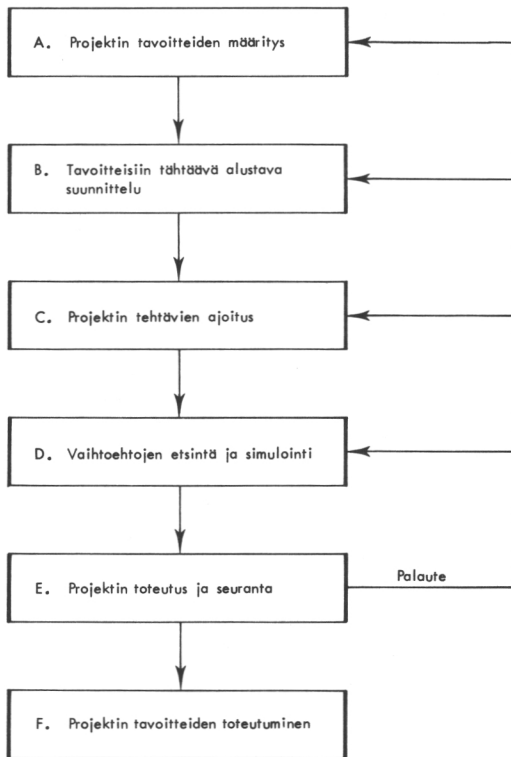
- projektin suunnittelussa ja toteutuksen seurannassa sovelletaan entistä yhtenäisempää ja järkevämpää menettelyä
- on siirrytty entistä pidemmälle tähtäävään ja yksityiskohtaisempaan suunnitteluun
- sisäinen ja ulkoinen tiedotustoiminta (raportointi) ja siten tehtävien koordinointi on tehostunut
- kustannusarvion ja aikataulun noudattamisen kannalta kriittisten tehtävien identifiointi on helpottunut
- vaihtoehtoisten ratkaisujen vaikutus projek-

tin toteutusaikaan, kustannuksiin ja resurssitarpeeseen voidaan nopeasti etukäteen selvittää (esim. toimintaverkko simulointimallina)

- projektin tai sen osatehtävien toteuttamisajankohdan todennäköisyys voidaan laskea (vain PERT).

Edellä esitetyn luettelon eri kohtia voidaan pitää verkkosuunnittelun käyttöarvoa kuvaavina alustavina hypoteeseina. Suppeiden ja yksinkertaisten hankkeiden toteuttaminen on vaivatonta. Mitä laajemmiksi, monitahoisemmiksi ja aikataulusidonnaisemmiksi projektit muodostuvat sitä vaikeammaksi tulee niiden menestyksellinen johtaminen. Verkkosuunnittelumenetelmät on kehitetty lähinnä viimeksi mainittujen kaltaisten projektien johtamisen apuvälineiksi.

Tämän tutkimuksen tarkoituksena on ensin yhdistellä ja kuvata metsällisten projektien suunnittelutarpeisiin sopivalta näyttävää verkkosuunnittelumenetelmää sekä toiseksi esittää



Kuva 0. Projektin johtamisen ja suunnittelun kehysmalli.

eräitä tämän menetelmän alustavia empirisiä metsällisiä sovellutuksia ja arvioida niiden kehittämissuuntia.

Kuvassa 0 on esitetty projektin johtamisen ja suunnittelun kehysmalli. Menestyksellinen projektin johtaminen aloitetaan tavoitteiden riittävän yksityiskohtaisella ja selkeällä määrittelyllä (lohko A, kuva 0).

Lohkossa B suoritetaan vahvistettuihin tavoitteisiin tähtäävä alustava suunnittelu. Se sisältää ensinnäkin tarvittavien tehtävien luetteloinnin olettaen käytettävän normaaleja työvuoroja ja -menetelmiä. Tässä vaiheessa laaditaan myöskin projektia kuvaava alustava toimintaverkko. Se on graafinen malli, jossa eri tehtävien keskinäiset riippuvuussuhteet ja toteutusjärjestys on täsmennetty.

Kuvan 0 lohkoissa C suoritetaan projektin tehtävien ajoitus. Siinä otetaan aluksi huomioon normaalisti käytettävissä olevat resurssit ja työajat. Kun menetelmän edellyttämät aikataulukalkelmat on suoritettu, saadaan tulokseksi perustoimintaverkko pelivara- ym. tietoineen.

Seuraavassa vaiheessa (lohko D, kuva 0) etsitään perustoimintaverkolle järkeviä vaihtoehtoja. Aikaansaatuja verkkoja voidaan käyttää simulointimallina (vrt. SEPPÄLÄ 5–12) pyrittäessä toteutusajan, kustannusten ja resurssien säätelyyn projektin tavoitteita tukevalla tavalla.

Projektia toteutettaessa muodostaa valmis toimintaverkko aikataulu-, kustannus- ja resurssitietoineen tehokkaan seurannan apuvälineen (lohko E, kuva 0). Muuttuvan tilanteen mukaisesti voidaan verkkosuunnittelu suorittaa osittain tai kokonaan uudelleen mistä tahansa edellä käsitellystä lohkoista alkaen (kuvan 0 palaute- nuolet).

Kuvan 0 lohkojen A–E tehtävien huolellinen läpivieminen johtaa projektin tavoitteiden menestykselliseen toteutukseen. Vaikka projektin tavoitteiden määrittäminen on vaikea ongelma (jota on puunkorjuun osalta tutkinut esimerkiksi KEIPI), rajataan se seuraavassa tämän tutkimuksen ulkopuolelle ja oletetaan tavoitteet annetuiksi. Lohkon B edellyttämää menetelmää esitellään luvussa 21. Lohkon C sisältöä valaistetaan luvussa 22 ja 23. Lohkoon D liittyviä tehtäviä analysoidaan luvussa 24 ja 25. Lohkon E periaate selviää tarkemmin luvusta 26. Tämän tutkimuksen empirinen osa esitellään luvussa 3. Lopuksi suoritetaan esiteltyjen menetelmien ja saatujen tulosten kriittinen arviointi luvussa 4.

2. VERKKOSUUNNITTELUMENETELMÄT

21. Toimintaverkko

211. Nuoliverkko

Toimintaverkon kehittäminen voidaan aloittaa, kun toteutettavalle projektille asetetut tavoitteet ja vaihtoehtoiset tuotantotekniikat on annettu. Toimintaverkko muodostaa verkkosuunnittelumenetelmän perustan. Se on projektin eri tehtävien ja tapahtumien riippuvuussuhteiden havainnollistamiseksi laadittu graafinen malli. Toimintaverkot jaetaan tehtävien ja tapahtumien kuvausmenetelmän perusteella lohko- ja nuoliverkkoihin. Seuraavassa kuvataan nuoliverkkoja. Lohkoverkkotekniikka esitellään luvussa 22.

Tehtävä (activity, job, task, operation) yhdistää kahta peräkkäistä tapahtumaa toimintaverkossa. Sitä ei voida aloittaa ennenkuin edeltävä tapahtuma on toteutunut. Tapahtuma katsotaan toteutuneeksi vasta, kun kaikki siihen päätyvät tehtävät on suoritettu. Tehtävä edustaa työtä, jonka suorittaminen vaatii tietyn kestoajan ja yleensä myös työntekijöitä, koneita, tarveaineita ym. panoksia. Jokaista yksityistä tehtävää kuvataan toimintaverkossa nuolella. Nuolen pituudella ja sen suunnalla ei tarvitse olla mitään yhteyttä ajan kulumisen tai panosten käytön kanssa. Se määräytyy pelkästään selkeyden pyrkivän piirtämistekniikan perusteella. Nuolen pyrstö osoittaa tehtävän alkua ja kärki sen loppua. Koko nuoli kuvaa vain tehtävän etenemistä ajassa sekä sitä loogista näkökohtaa, ettei tehtävän loppu voi edeltää sen alkua.



Kuva 1. Toimintaverkon tehtävien ja tapahtumien symbolit.

Projektin eri tehtävien suoritusjärjestyksen erittelyssä tulee suunnittelijan tehdä kunkin tehtävän kohdalla kysymykset:

- Mitkä tehtävät edeltävät sitä?
- Mitkä tehtävät voidaan suorittaa samanaikaisesti?
- Mitkä tehtävät seuraavat sitä?
- Mitkä tehtävät rajoittavat sen alkutapahtumaa?

- Mitkä tehtävät rajoittavat sen lopputapahtumaa?

Tehtävien erittelyn yhteydessä ne on varustettu kirjaintunnuksin. Edellisiin kysymyksiin nojautuen voidaan tehtäviä edustavat nuolet asettaa suoritusjärjestykseen (kuva 2). Esimerkit havainnollistavat tätä koko menetelmän kannalta ensiarvoisen tärkeää vaihetta.

Aputehtävää (dummy job) tarvitaan tapauksissa, jolloin halutaan estää esim. tapahtuman j esiintyminen ennen tapahtumaa i, kun mikään tehtävä ei yhdistä näitä tapahtumia. Aputehtävän tarkoituksena on ilmaista tapahtumien aikajärjestys. Sen suorittaminen ei vaadi aikaa (kesto = 0). Aputehtävän symboli on katkoviivanuoli. Kuvan 2 kohdassa (5) on esimerkki aputehtävän soveltamisesta.

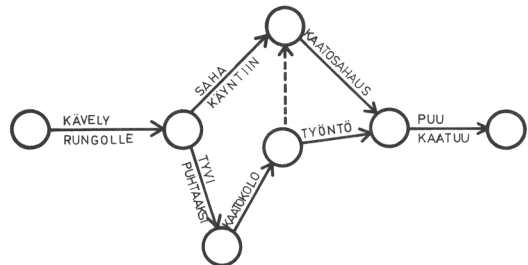
Esimerkkinä toimintaverkon koostamisesta otettakoon kahden miehen työryhmän vanhahava ”puunkaato projekti”. Ensimmäisessä vaiheessa projekti eritellään itsenäisiin resursseja ja/tai aikaa vaativiin tehtäviin:

- kävely rungolle (A)
- tyven puhdistus (esim. lumesta) (B)
- sahan käynnistäminen (C)
- kaatokolon teko kirveellä (D)
- kaatosahaus (E)
- edellistä avustava työntö (F)
- puun kaatuminen (G)

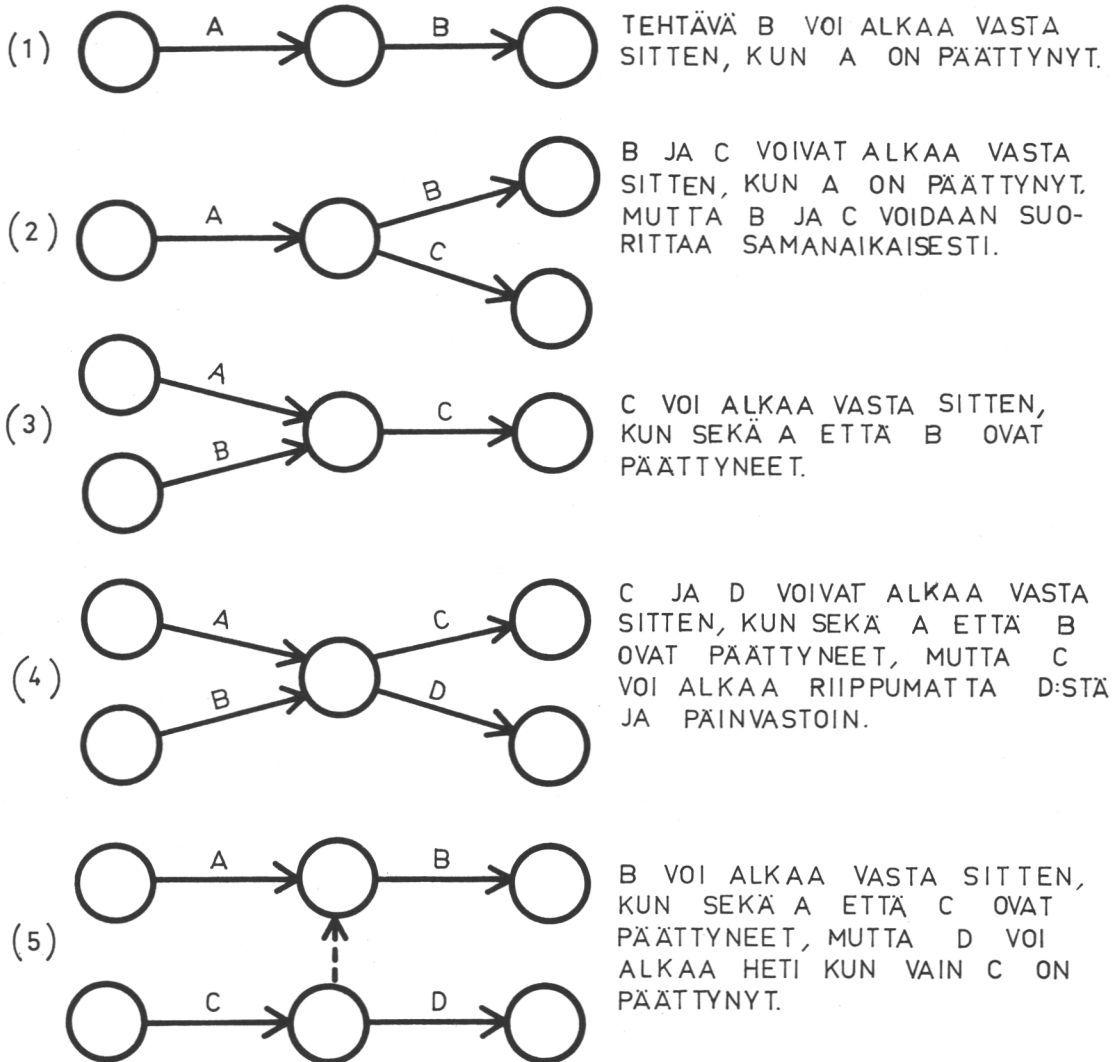
Huomattakoon aputehtävän käyttö. Kaatosahaus voi alkaa vasta sitten, kun saha on käynnistetty ja aputehtävän osoittama kaatokolo on valmis.

Myöhemmin suoritettavia laskelmia varten tapahtumat numeroidaan.

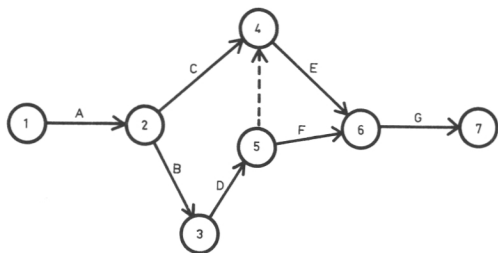
Alkutapahtuman numero on 1. Alkutapahtuma on tapahtuma, josta alkaa jokin tehtävä,



Kuva 3. Kahden miehen ”puunkaato projektiin” alustava toimintaverkko.



Kuva 2. Tehtävien suoritusjärjestys toimintaverkossa (SHAFFER ym. 9).



Kuva 4. ”Puunkaato-projektin” numeroitu toimintaverkko.

mutta johon ei pääty yhtään tehtävää. Muut tapahtumat voidaan numeroida edeten alkutapahtumasta oikealle. Numerointijärjestyksellä ei ole merkitystä muutoin kuin, että jokaisen tehtävän alkutapahtuman numero on pienempi kuin lopputapahtuman. Ajoituksen tietokone-laskennassa saattaa tosin ohjelman valinta vai- kuttaa numerointisääntöihin.

Kuvasta 4 nähdään, että kukin tehtävä voi- daan nyt yksilöidä, paitsi sanallisesti tai kirjain- koodilla, niin myös sitä rajoittavien tapahtu- mien numeroilla, esim. kaatosahaus = E = teh- tävä 4–6.

Verkkojen piirtäminen voidaan tehdä joko edeten ajan kulkusuuntaan vasemmalta oikealle tai päinvastoin alkaen lopputapahtumasta. Mo- nitahoisissa verkoissa käytetään molempaa ta- paa ja lisäksi voidaan aloittaa verkon piirtämi- nen myös projektin keskeltä. Näin voi usea hen- kilö samanaikaisesti olla yhden laajan verkon piirtämistyössä. Lopuksi on syytä tähdentää, ettei tapahtumia saa yhdistää toisiinsa nuolilla siten, että kulkemalla nuolien osoittamaa pol- kua tullaan takaisin tapahtumaan, josta on läh- detty liikkeelle (ks. KARLSSON 13; LOCKYER 29–30).

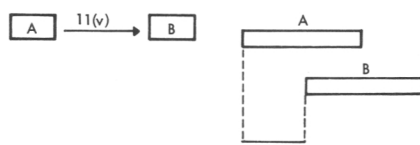
212. Lohkoverkko

Lohkoverkon esitystapa kuvataan seuraavas- sa lähinnä PERT E:n (Valtion tietokonekeskuk- sen lohkoverkko-ohjelma) mukaisesti. Lohko- verkon osasia ovat tehtävät ja niiden väliset riip- puvuussuhteet. Edellisiä kuvataan suorakaiteilla ja jälkimmäisiä koodimerkein varustetuilla nu- oilla. Käytetty koodi täsmentää riippuvuusuh- teen laadun.

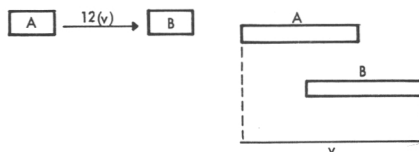
Riippuvuudet jaetaan täsmällisen merkityk- sensä perusteella neljään tyyppiin, joista kulle-

kin on vahvistettu oma koodi. Jokaiselle koo- ditetulle riippuvuusnuolelle arvioidaan kesto eli viive, jolla tarkoitetaan edeltävän tehtävän ja seuraavan tehtävän välistä (pienintä sallittua) aikaeroa. Riippuvuustyyppi osoittaa, kuinka tämä tehtävien välinen viive tulkitaan. Riip- puuustyyppi ilmaistaan kaksinumeroisella koo- dilla (11, 12, 21 ja 22), jossa ensimmäinen nu- mero tarkoittaa edeltävää ja toinen numero seu- raavaa tehtävää. Seuraavassa täsmennetään eri riippuvuustyyppien sisältö. Viiveen arvoa mer- kitään v-kirjaimella.

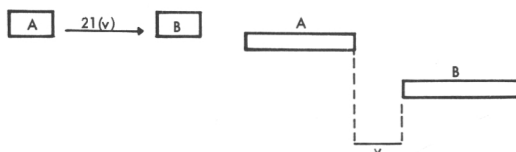
Riippuvuustyyppi 11. Jos tehtävien välinen riippuvuus on tyyppiä 11, niin viive tarkoittaa tehtävien alkamispäivien välistä aikaeroa.



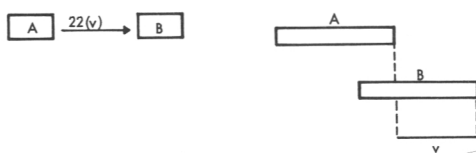
Riippuvuustyyppi 12. Jos taas riippuvuus on tyyppiä 12, niin viive ilmoittaa edeltävän tehtävän alkamispäivän ja seuraavan tehtävän loppu- mispäivän välisen aikaeron.



Riippuvuustyyppi 21. Tässä tapauksessa viive ilmoittaa edeltävän tehtävän loppumispäivän ja seuraavan tehtävän alkamispäivän välisen eron.



Riippuvuustyyppi 22. Jos riippuvuus on tyyppiä 22, niin viive merkitsee tehtävien lop- pumispäivien välistä aikaeroa.



Kaikki projektiin kuuluvat tehtävät sekä niiden väliset eri tyyppiset riippuvuussuhteet identifioidaan ja piirretään toimintaverkoksi. Lohkot varustetaan numerotunnuksin. Seuraavia verkon laatimissääntöjä tulee noudattaa:

1. Kahdella eri tehtävällä ei saa olla samaa tehtävänumeroa.
2. Tehtävien välisen riippuvuusnuolen vaikutus on seuraava: Seuraavan tehtävän aikaisin alkamispäivä (tai riippuvuustyyppien 12 ja 22 tapauksessa loppumispäivä) saadaan lisäämällä edeltävän tehtävän loppumispäivään (tai tapauksissa 11 ja 12 alkamispäivään) kyseisten tehtävien välinen viive.
3. Kunkin tehtävän aikaisin suoritus aika saadaan siten, että valitaan tähän tehtävään vaikuttavista riippuvuuksista se, joka myöhästyttää tehtävän suoritus aikaa eniten.
4. Edettäessä verkossa riippuvuusnuolien suuntaan, ei saa koskaan muodostua sulkeutuvaa silmukkaa.
5. Verkossa saa olla useita alku- ja lopputehtäviä (alkutehtävä on sellainen tehtävä, johon ei tule yhtään riippuvuusnuolta ja lopputehtävä on sellainen tehtävä, josta ei lähde yhtään riippuvuusnuolta).
6. Kahden tehtävän välillä voi olla useita riippuvuuksia.
7. Viive saa olla myös negatiivinen.

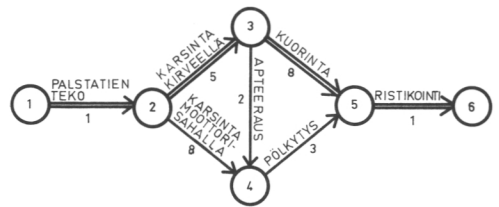
Tietokoneiden eri laskentaohjelmissa saattavat lohkonverkon laatimissäännöt hieman vaihdella. – Lohkonverkon laatiminen lienee yleensä nuoliverkon tekemistä joustavampaa. Toisaalta valmis nuoliverkko on yksinkertaisemmän näköinen ja siten myös sellaisenaan informatiivisempi. Nykyisin on eräitä tietokoneohjelmia, jotka lukevat molempien verkkojen mukaisia tietoja ja muuntavat ne automaattisesti ohjelman perusverkkoja koskeviksi, esimerkiksi IBM System/360 PCS muuntaa nuoliverkot lohkonverkoiksi.

22. Aikakäsitteet

Verkkosuunnittelun aikalaskelmilla pyritään kolmeen päätavoitteeseen:

1. Projektin valmistumisaikataulun määrittämiseen.
2. Kriittisen polun etsintään.
3. Pelivaran määrittämiseen ei-kriittisten tehtävien suoritusajoissa.

Käsitteellä *kesto* (duration) tarkoitetaan jon-



Kuva 5. Kriittinen polku: tehtävät 1–2, 2–3, 3–5 ja 5–6.

kin toimintaverkon tehtävän suorittamiseen vaadittavan ajan kulumista sen aloitushetkestä lopetushetkeen. Käsitteellä ajankohta (time) ymmärretään sitä hetkeä, jolloin jokin toimintaverkon tapahtuma toteutuu. (BATTERSBY 31.)

221. Kriittinen polku

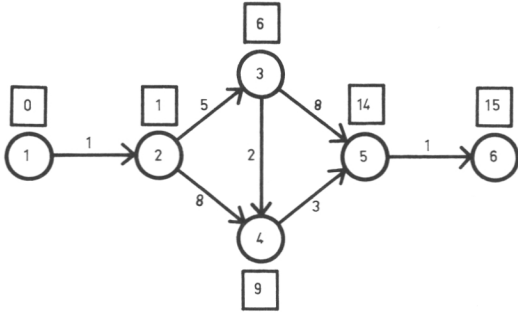
Toimintaverkon yksittäiset tehtävät jaetaan kahteen pääryhmään, kriittisiin ja ei-kriittisiin. Aikaisemmin kuvassa 3 esitelty kahden miehen työryhmä jatkaa töitään kuvassa 5. Kutakin tehtävää kuvaavan selosteen alla on esitetty tehtävän suorituksen kestoarvio päivinä. Koko projektin kesto on siis 15 päivää. Tehtävät 1–2, 2–3, 3–5 ja 5–6 muodostavat kriittisen polun. Jokainen viivästymä näiden tehtävien kestoissa aiheuttaa vastaavan viivästymän koko projektin kestoan. Toisaalta taas nopeuttamalla kriittisen polun tehtävien kestoja nopeutetaan samalla koko projektin kesto. Tehtävät 2–4, 3–4 ja 4–5 eivät ole kriittisellä polulla. Ne kuuluvat siten ryhmään ei-kriittiset tehtävät.

Kriittisten tehtävien osuus kaikista tehtävistä on tässä onnepsaassa verkossa suhteellisen korkea. Verkkojen koon kasvaessa tämä osuus yleensä nopeasti laskee. Niinpä esim. suurissa rakennusalan projekteissa kriittinen polku saattaa sisältää vain n. 10–15 % kaikista tehtävistä (BATTERSBY 32).

222. Laskennalliset käsitteet

Ajoituslaskelmissa tarvittavat tunnuksot on merkitty seuraavien symbolein:

- t = Keston arvio
 TA = Tapahtuman aikaisin (mahdollinen) ajankohta
 TM = Tapahtuman myöhäisin (mahdollinen) ajankohta



Kuva 6. Tapahtumien aikaisimmat ajankohdat.

- AA = Tehtävän aikaisin (mahdollinen) aloitusajankohta
 AL = Tehtävän aikaisin (mahdollinen) lopetusajankohta
 MA = Tehtävän myöhäisin (mahdollinen) aloitusajankohta
 ML = Tehtävän myöhäisin (mahdollinen) lopetusajankohta
 KP = Kokonaispelivara
 VP = Vapaa pelivara

Kuvan 6 neliöissä olevat numerot ilmoittavat *tapahtumien aikaisimmat ajankohdat*. Jos tapahtuman 1 $TA = 0$, niin tapahtuma 2 sattuu ajankohtana 1 ja tapahtuma 3 ajankohtana 6. Tapahtumaan 4 johtaa kaksi reittiä. Tehtävä 2–4 toteutuu ajankohtana $1 + 8 = 9$ ja tehtävä 3–4 ajankohtana $6 + 2 = 8$.

Tapahtuma 4 toteutuu siis ajankohtana 9 eli sitä edeltävien tehtävien myöhäisimpänä lopetusajankohtana. Ajankohta 9 on puolestaan tehtävän 4–5 aikaisin aloitusajankohta eli $AA_{4,5} = 9$.

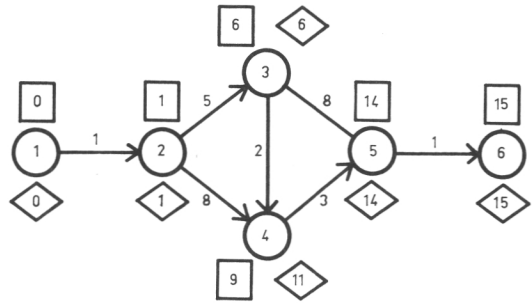
Tapahtuman 5 aikaisin ajankohta on 14 ($TA_5 = 14$). Sinne päädytään jälleen kahta polkua:

- tehtävä 3–5 $\rightarrow 6 + 8 = 14$
- tehtävä 4–5 $\rightarrow 9 + 3 = 12$

Tapahtuman 5 aikaisin ajankohta 14 on jälleen myös tehtävän 5–6 aikaisin aloitusajankohta eli $TA_5 = AA_{5,6} = 14$.

Edellä esitetty tapahtuman aikaisimman ajankohdan määrittely voidaan kiteyttää seuraaviksi säännöiksi ja kaavoiksi:

1. sääntö: jokainen tehtävä voi alkaa heti, kun sitä edeltänyt tapahtuma on toteutunut
1. kaava: $AA_{i, (i+1)} = TA_i$, jolloin $AL = AA + t = TA + t$



Kuva 7. Tapahtumien aikaisimmat (\square) ja myöhäisimmät (\diamond) ajankohdat.

2. sääntö: tapahtuman aikaisin ajankohta on suurin siihen päättyvien tehtävien aikaisimmista lopetusajankohdista
2. kaava: $TA_i = \max(AL_1, AL_2, \dots, AL_n)$, jossa $n = TA_i$:hin päättyvien tehtävien luku.

Kuvan 7 vinoneliöiden numerot osoittavat *tapahtumien myöhäisimmät ajankohdat*.

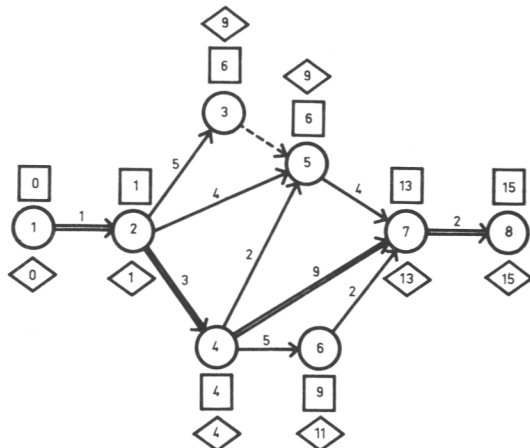
Jonkin tapahtuman myöhäisin ajankohta lasketaan aikaisimpaan ajankohtaan verrattuna päinvastaisessa järjestyksessä. Esim. tapahtuman 5 myöhäisin ajankohta saadaan vähentämällä 15:sta tehtävän 5–6 kesto, siis $15 - 1 = 14$. Tapahtumaan 3 johtaa jälleen kaksi polkua:

- tehtävä 3–5 $\rightarrow 14 - 8 = 6$
- tehtävät 4–5 ja 3–4 $\rightarrow 14 - 5 = 9$

Saaduista vaihtoehdoista tulee valita pienin. Muutoin ei tapahtuma 5 voi toteutua ajankohtana 14.

Tapahtuman myöhäisimmän ajankohdan määrittäminen voidaan kiteyttää seuraavasti:

1. sääntö: Toimintaverkon päätapahtuman myöhäisin ajankohta on sama kuin sen aikaisin ajankohta
1. kaava: $TM_n = TA_n$, ($n =$ toimintaverkon tapahtumien luku)
2. sääntö: Tehtävän myöhäisin aloitusajankohta on sitä seuraavan tapahtuman myöhäisin ajankohta vähennettynä ko. tehtävän kestolla
2. kaava: $ML_{(i-1), i} = TM_i$; $MA_{(i-1), i} = ML_{(i-1), i} - t = TM_i - t$
3. sääntö: Tapahtuman myöhäisin ajankohta on pienin siitä lähtevien tehtävien myöhäisimmistä aloitusajankohdista
3. kaava: $TM_i = \min(MA_{i,1}, MA_{i,2}, \dots, MA_{i,n})$, tapahtumasta i haarautuu n tehtävää.



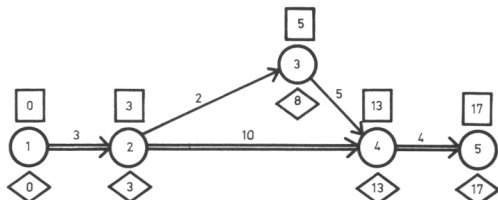
Kuva 8. Tapahtumien aikaisimmat (□) ja myöhäisimmät (◇) ajankohdat (BATTERSBY 35).

Huomattakoon, että kaikki ne tapahtumat, joiden aikaisin ja myöhäisin ajankohta on sama, kuuluvat kriittiselle polulle. Esitettyjen käsitteiden havainnollistamiseksi on kuvaan 8 piirretty edellisiä hieman laajempi toimintaverkko. Siihen on laskettu kunkin tapahtuman aikaisin ja myöhäisin ajankohta.

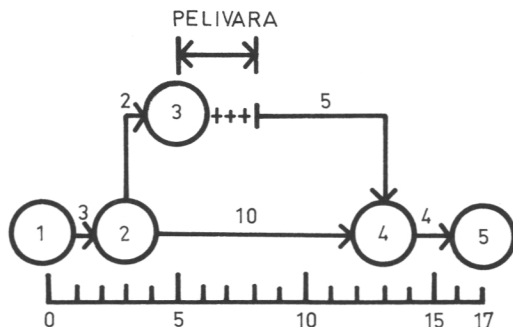
Pelivaran (float) määrittelemiseksi tarkastellaan aluksi kuvassa 9 esitettyä yksinkertaista toimintaverkkoa. Siinä on näkyvissä aikaisemman merkintätavan mukaisesti tehtävien kestot (tunteina) ja tapahtumain aikaisimmat ja myöhäisimmät ajankohdat.

Ainoastaan tehtävät 2–3 ja 3–4 jäävät kriittisen polun ulkopuolelle. Niiden yhteinen kesto on seitsemän tuntia. Vastaava kriittisen polun (tehtävän 2–4) kesto on 10 tuntia. Tätä erotusta (tässä siis kolme tuntia) kutsutaan pelivaraksi.

Pelivarakäsitettä voidaan havainnollistaa piirtämällä edellisen kuvan toimintaverkko aikamittakaavaan (kuva 10).



Kuva 9. Tavanomainen toimintaverkko (BATTERSBY 38).



Kuva 10. Kuvan 9 toimintaverkko aikamittakaavassa (BATTERSBY 38).

Jos tehtävän 2–3 todellinen kesto jostain syystä venähtäisi kolme tuntia arvioitua pidemmäksi, eivät tapahtumien 4 ja 5 ajankohdat viivästyisi, mutta pelivara olisi menetetty. Tilanne on sama, jos viivästyminen sattuisi tehtävän 3–4 kestossa. Jos esim. tehtävän 3–4 keston viivästyminen on kolme tuntia, on tehtävän 2–3 vapaa pelivara nolla. Polulla 2–3–4 on siis käytettävissä vain kolmen tunnin kokonaispelivara.

1. sääntö: Kokonaispelivara (KP) saadaan vähentämällä tehtävän päätetapahtuman myöhäisimmästä ajankohdasta ko. tehtävän aikaisin lopetusajankohta. Kokonaispelivara on siis sellainen aikamäärä, jolla tehtävän kesto voi viivästyä sen estämättä kriittisen polun tehtävien aloittamista viivästyksen niiden myöhäisimpinä ajankohtina.

1. kaava: $KP_i, (i+1) = TM_{i+1} - AL_{i, (i+1)}$

2. sääntö: Vapaa pelivara (VP) saadaan vähentämällä tehtävän päätetapahtuman aikaisimmasta ajankohdasta ko. tehtävän aikaisin lopetusajankohta. Vapaa pelivara on siis sellainen aikamäärä, jolla tehtävän kesto voi viivästyä sen estämättä toimintaverkon minkään muun tehtävän käynnistämistä ko. aikaisimpana aloitusajankohtana.

2. kaava: $VP_{i, (i+1)} = TA_{i+1} - AL_{i, (i+1)}$

(Esitettyjen sääntöjen ja kaavojen osalta ks. esim. MODER ym. 50–60.)

23. Aika-analyysi

231. Pelivaran laskenta

Pelivarat voidaan laskea soveltamalla edelli-

Taulu 1. Pelivaran laskenta kuvan 9 toimintaverkosta (BATTERSBY 39).

1		2	3	4	5	6	7	8
Tehtävä <i>i j</i>	Kesto (tuntia) <i>t</i>	Aikaisin		Myöhäisin		Pelivara (tuntia)		
		Aloitus AA	Lopetus AL	Aloitus MA	Lopetus ML	Kokonais KP	Vapaa VP	
1 – 2	3	0	3	0	3	0	0	
2 – 3	2	3	5	6	8	3	0	
2 – 4	10	3	13	3	13	0	0	
3 – 4	5	5	10	8	13	3	3	
4 – 5	4	13	17	13	17	0	0	

sessä kappaleessa esiteltyä graafista menettelytapaa, jossa siis toimintaverkko piirretään aikamittakaavaan. Laskenta voi tapahtua luonnollisesti myös esitettyjen kaavojen mukaan ilman erityismenettelyä.

Mitä laajemmista verkoista on kyse, sitä ilmeisemmiksi tulevat seuraavassa esiteltävän taulumenetelmän edut pelivarojen laskennassa.

Taulussa on laskettu kuvan 9 verkon pelivarat. Luvut sarakkeisiin 1, 2, 3 ja 6, siis tehtävät (alku- ja lopputapahtumien numeroilla), niiden kestot sekä alkutapahtumien aikaisimmat (TA = AA) ja lopputapahtumien myöhäisimmät (TM = ML) ajankohdat, saadaan suoraan ao. verkosta. Aikaisin lopetusajankohta (sarake 4) saadaan lisäämällä kesto aikaisimpaan aloitusajankohtaan, siis $AL = AA + t$. Esim. $AL_{1,2} = 0 + 3 = 3$. Sarakkeen 5 myöhäisin aloitusajankohta saadaan vähentämällä myöhäisimmästä lopetusajankohdasta vastaava kesto eli $MA = ML - t$ ($MA_{1,2} = 3 - 3 = 0$).

Kunkin tehtävän kestoön käytettävissä oleva kokonaisuikamäärä on myöhäisimmän lopetus (ML) ja aikaisimman aloitusajankohdan (AA) erotus ($ML - AA$). Kokonaispelivara (KP) saadaan siten vähentämällä tästä erotuksesta ao. kesto, jolloin $KP = ML - (AA + t)$, esim. $KP_{2,3} = 8 - (3 + 2) = 3$.

Tietyn tehtävän vapaa pelivara (VP) on käytettävissä oleva keston viivästyminen, kun kaikki tehtävät aloitetaan aikaisimpana mahdollisena ajankohtana. Jos esim. tehtävä 3–4 aloitetaan aikaisimpana ajankohtana (5), niin se päättyy ajankohtana 10. Koska tehtävän 4–5 aikaisin ajankohta on 13, on saatu kolmen tunnin erotus tehtävän 3–4 vapaa pelivara, siis

$$VP_{(i-1), i} = AA_i, (i+1) - AL_{(i-1), i}; \\ VP_{3,4} = 13 - 10 = 3$$

Pelivara saattaa tulla myös negatiiviseksi. Jos koko projektin halutaan valmistuvan määrällään, tulee tällaiset negatiiviset pelivarat eliminoida lyhentämällä ko. tehtävien kestoja.

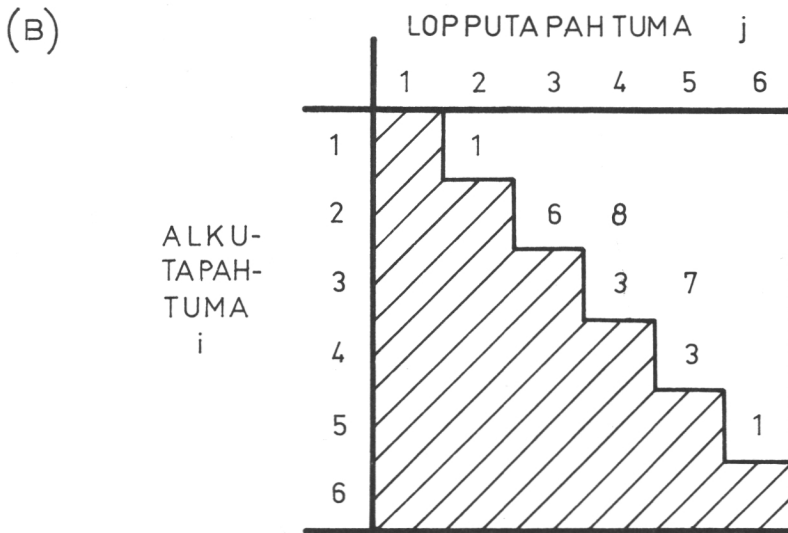
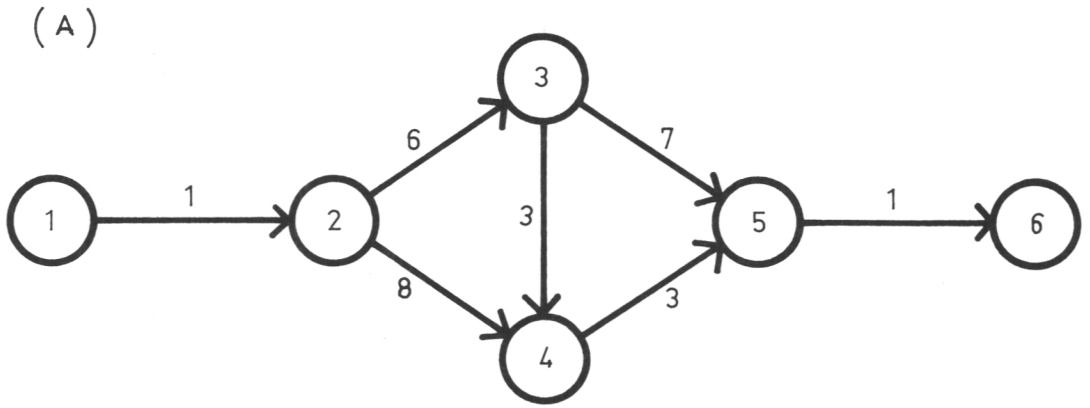
232. Matriisimenetelmä

Jokainen toimintaverkko voidaan esittää myös matriisin muodossa. Esim. kuvan 11 verkosta (A) saadaan saman kuvan alaosassa näkyvä matriisi (B).

Matriisikehikon sisälle merkityt numerot osoittavat vastaavien rivien ja sarakkeiden alkua ja lopputapahtumien identifioimien tehtävien kestoja. Siis esim. 6 viittaa alkutapahtumaan 2 ja lopputapahtumaan 3 ja on siten tehtävän 2–3 kesto. Vinoviivoitetulla alueella ei kestonumeroiden esiintyminen ole loogisesti mahdollista.

Tapahtumien aikaisimmat ja myöhäisimmät ajankohdat löytyvät analysoimalla matriisi toimintaverkon tapaan.

Analyysi (kuva 12) aloitetaan sijoittamalla nolla sarakkeen t_j ensi riville. Seuraavaksi etsitään tapahtuman 2 aikaisin ajankohta. Sarake 2 sisältää vain yhden kestoarvion, koska tapahtumaan 2 johtaa vain yksi tehtävä. Tämä arvio (1) lisätään t_j -sarakkeen saman rivin lukuun, jolloin saadaan $: 1 + 0 = 1$. Saatu summa (1) on etsitty t_j -sarakkeen toisen rivin luku. Tapahtumalle 3 saadaan vastaavasti: $t_j = 6 + 1 = 7$.



Kuva 11. Toimintaverkon (A) matriisimuoto (B).

Sarake 4 sisältää kaksi arviota. Edellisen menettelyn mukaisesti saadaan: $8 + 1 = 9$; $3 + 7 = 10$. Saaduista summista suurempi siirretään rivin neljä t_i -arvoksi. Tapahtuman 5 t_i on siis $7 + 7 = 14$ ja tapahtuman 6 $t_i = 1 + 14 = 15$.

Tapahtuman myöhäisimmän ajankohdan (t_j) analyysi etenee jälleen edelliseen verraten päinvastaisessa järjestyksessä. Sarakkeen 6 pohjariville sijoitetaan ensin 15, joka on tapahtuman 6 myöhäisin ajankohta. Seuraavaksi katsotaan tilanne rivillä 5. Sieltä löytyy vain yksi kestoarvio (1) sarakeesta 6. Vähentämällä tämä saman sarakkeen pohjalla olevasta t_j -arvosta (15) saadaan tapahtuman 5 $t_j = 15 - 1 = 14$. Vastavasti sijoitetaan $14 - 3 = 11$ sarakkeen 4 pohjalle.

MATRIISI H	LOPPUTAPAHTUMA j						TAPAHTUMAN AIKAINEN AJANKOHTA t_i
	1	2	3	4	5	6	
1							0
2		1					1
3		6	8				7
4			3	7			10
5				3			14
6					1		15
TAPAHTUMAN MYÖHÄISIN AJANKOHTA t_j	0	1	7	11	14	15	

Kuva 12. Kuvan 11 matriisianalyysi (BATTERSBY 48).

Rivi 3 sisältää kaksi arvoa, tehtävien 3–4 ja 3–5 kestot. Niistä saadaan jälleen kaksi erotusta: $14 - 7 = 7$ ja $11 - 3 = 8$. Nyt valitaan tapahtuman 3 t_j -arvoksi niistä pienempi eli 7.

Kun koko matriisi on saatu valmiiksi, voidaan saatujen tapahtuma-ajankohtien perusteella etsiä kriittinen polku, kaikkien tehtävien aikaisimmat ja myöhäisimmät aloitus- ja lopetusajankohdat sekä vastaavat pelivarat aikaisemmin kohdassa 231 esitetyn menettelyn mukaisesti. Muistettakoon, että aputehtävien kestot (= 0) tulee aina merkitä matriisiin nollina näkyviin.

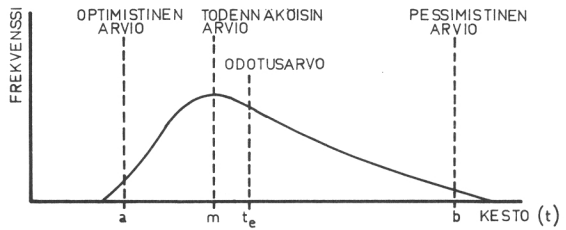
Etenkin suurehkojen verkkojen analyysissä tarjooa matriisimenetelmä hyvän apukeinon systemaattista laskentaa sekä tietokoneohjelmointia varten. Erityisesti kun tehtäviä on tapahtumiin verrattuna runsaasti, matriisi saattaa olla helpommin analysoitavissa kuin vastaava verkko.

233. Tilastollinen menetelmä

Projektien suunnittelussa liikutaan aina tulevien tapahtumien parissa. Esim. tehtävien kestoarvot saatetaan perustaa vain menneisyydestä saatuihin kokemuksiin. Tällöin edellytetään, että vastaavia projekteja on aikaisemmin toteutettu. Kestoarvioissa voidaan silloin nojautua joko erityisten aikautukimusten tuloksiin tai asiantunteviin arviointeihin. Esim. eri tehtävistä vastuussa olevat työnjohtajat tekevät kestoarvot milloin aikautukimuksia ei ole suoritettu.

Projektin määritelmän mukaan (s. 7) sille on tyypillistä, ettei kahta samanlaista projektia voida toteuttaa täsmälleen samalla tavalla. Epävarmuutta aiheuttavat esim. säätilojen vaihtelut. Tämän tekijän merkitys on keskeinen etenkin metsällisissä projekteissa. Suunnittelijat joutuvatkin lähtemään siitä tosiasista, että tulevaisuus on aina epävarma, etenkin kun on kyse projekteista. Kesto-, kustannus- ja resurssiarvioiden teko on siis aina ennakointia.

PERT-menetelmän omintakeisena sisältönä on epävarmojen kestoarvioiden tilastotieteellinen käsittely. Kestoarvioiden tekijällä tulee olla selvä käsitys eri tehtävien toteuttamiseen käytettävissä olevien eri resurssilajien määristä. Tilastotieteelliseen analyysiin vaaditaan kriittisen polun jokaista tehtävää koskevat seuraavat kolme kestoarviota:



Kuva 13. Tehtävän keston teoreettinen frekvenssijakauma.

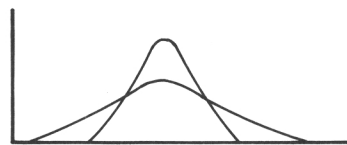
- Optimistinen arvio = kestoarvio, joka tehtävää toistettaessa todennäköisesti alitettaisiin vain kerran sadassa tapauksessa.
- Todennäköisin arvio = arvio, joka tehtäisiin, jos vaadittaisiin vain yksi kestoarvio. Se tarkoittaa myös kestoja, joka useimmin sattuisi, jos ko. tehtävä toistettaisiin monia kertoja tai jos kestoarvioita tiedusteltaisiin useilta henkilöiltä (= moodi).
- Pessimistinen arvio = kestoarvio, joka todennäköisesti ylitettäisiin vain kerran sadassa tapauksessa (kuva 13).

Sen jälkeen kun kestoarvot on tehty, niitä ei saa muuttaa ellei tehtävän sisällössä, resurssissa tai tiedon tasossa ole tapahtunut muutosta (MODER ym. 205). Arvioimistyötä vaikeuttaa tehtävien kestoihin vaikuttavien muuttujien lukuisuus, niiden hankala kontrolloitavuus sekä yleensä myös empiirisen aineiston niukkuus.

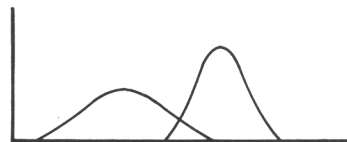
Eri tehtävien kestoajakaumista pyritään laskemaan aritmeettisen keskiarvon estimaatti ja-



JAKAUMILLA ON SAMANSUURUISET HAJONNAT MUTTA ERI KESKIARVOT.



JAKAUMILLA ON SAMAN KESKIARVO MUTTA ERISUURUISET HAJONNAT.



JAKAUMILLA ON ERISUURUISET KESKIARVOT JA HAJONNAT.

Kuva 14. Keskeisyyden ja hajonnan tunnusluvut erilaisissa jakaumissa (MODER ym. 199).

kauman keskeisyyden sekä varianssin estimaatti hajonnan mitaksi. Näiden tunnuslukujen suhtautuminen toisiinsa erimuotoisissa jakaumissa on esitetty kuvassa 14.

Tunnuslukujen estimaattien laskenta perustuu useimmiten olettamuksiin eri kestojen jakaumatyypeistä. Empiiristä tietoutta voitaisiin tietysti saada kirjaamalla toteutettujen tehtävien kestot (ts. aikatutkimuksia). Tällöin tulisi tietyn tehtävän mitattu kesto ymmärtää yhdeksi otokseksi ko. keston hypoteettisesta frekvensijakaumasta.

Yksimoodisissa jakaumissa voidaan standardipoikkeaman arvioida olevan karkeasti n. 1/6 jakauman vaihteluvälistä (MODER ym. 206). Tällöin kyetään laskemaan keston varianssi (V_{te}) tehtyjen kestoarvioiden perusteella seuraavasti (muut symbolit, ks. kuva 13, s. 17).

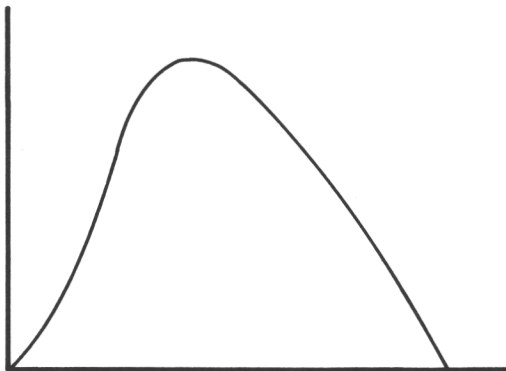
$$V_{te} = [(b - a)/6]^2$$

Keston odotusarvon (t_e) laskemiseksi on esitetty kaava:

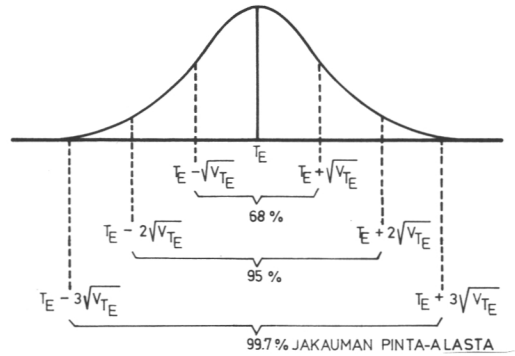
$$t_e = (a + 4m + b)/6$$

Esitetty tehtävän keston odotusarvon ja varianssin laskentamenetelmä perustuu olettamukseen, että kesto seuraa beta-jakaumaa (kuva 15). Tämän olettamuksen teorian kehittäminen on vielä jossain määrin kesken. Määrittelyyn sisältyy siis tältä osin likimääräisyyttä (BATTERSBY 170–175).

Kun lasketaan yhteen koko projektin tai yleensä vähintään n. kymmenen tehtävän kestoajan odotusarvot, saadaan tulokseksi summa, jonka jakauma on likimain normaali (keskeinen



Kuva 15. Esimerkki beta-jakauman muodosta (BATTERSBY 173).



Kuva 16. Normaalijakauma projektin keston jakauman estimaattina.

raja-arvolause, ks. esim. MODER ym. 200). Sen keskiarvo (T_E) ja varianssi (V_{TE}) lasketaan yksinkertaisesti seuraavasti (edellyttäen, että eri tehtävien kestot ovat toisistaan riippumattomia):

$$T_E = t_{e1} + t_{e2} + t_{e3} + \dots + t_{em}$$

$$V_{TE} = V_{te1} + V_{te2} + V_{te3} + \dots + V_{tem}$$

Koko projektin keston jakauman voidaan siis yleensä katsoa lähestyvän normaalia jakaumaa (kuva 16).

Kuvassa 17 (s. 19) on a-kohdassa merkitty näkyviin toimintaverkkoon kestoarviot a, m ja b (ks. kuva 13, s. 17). Kuvan keskiosassa (b) esiintyvät arvot on laskettu kaavoilla:

$$t_e = (a + 4m + b)/6, \text{ esim. tehtävä 1-2: } (1 + 4 \times 2 + 3)/6 = 2$$

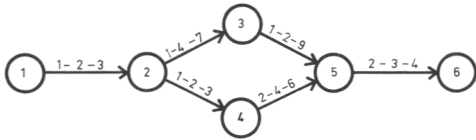
$$V_{te} = [(b - a)/6]^2, \quad \text{--''--} \quad :$$

$$[(3 - 1)/6]^2 = 1/9$$

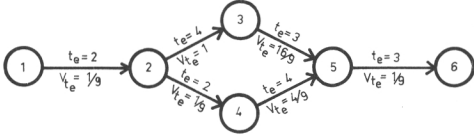
Kohdassa c on esitetty lopullisina tuloksina koko projektin lopputapahtuman aikaisimman ajankohdan eli siis projektin keston odotusarvo (T_E), eri tehtävien kokonaispelivarat (KP) ja varianssit V_{TE} .

Normaali aika-analyysi tapahtuu edellä luvuissa 231 ja 232 esitettyjen menettelyjen mukaisesti.

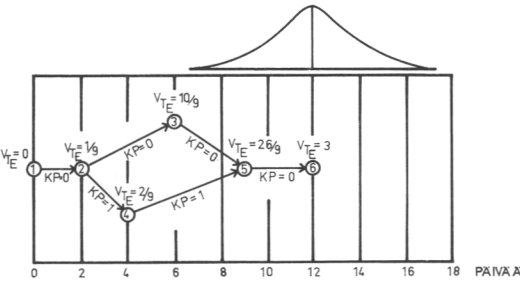
Tilastollisella menetelmällä voidaan laskea projektin valmistusodennäköisyys sovittuun päivään (T_S) mennessä. Menetelmää havainnollistaa kuva 18. Siinä on $T_E = 12$ ja $T_S = 14$. Koska koko normaalikäyrän rajoittama pinta-ala on tasan yksi, ilmoittaa vinoviivoitetun alan osuus koko pinta-alasta suoraan projektin todell-



a) Toimintaverkon jokaiselle tehtävälle merkity kestoarvot a, m ja b.



b) t_e - ja V_{t_e} -arvot laskettu kullekin tehtävälle.



c) KP- (ks. s. 14) ja V_{T_E} -arvot laskettu kullekin tehtävälle ja tapahtumalle.

Kuva 17. Esimerkki tilastollisen menetelmän laskennan eri vaiheista (MODER ym. 208).

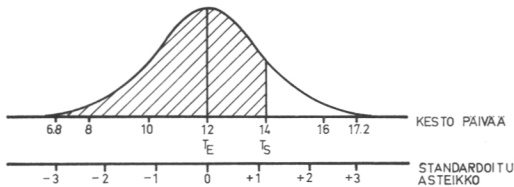
lisen valmistusajankohdan (T_E) sattumistodennäköisyyden sovittuun päivään ($T_S = 14$) mennessä.

Täsmälliseen prosenttilukuun pyrittäessä muunnetaan erotus ($T_S - T_E$) standardoituun asteikkoon kaavalla

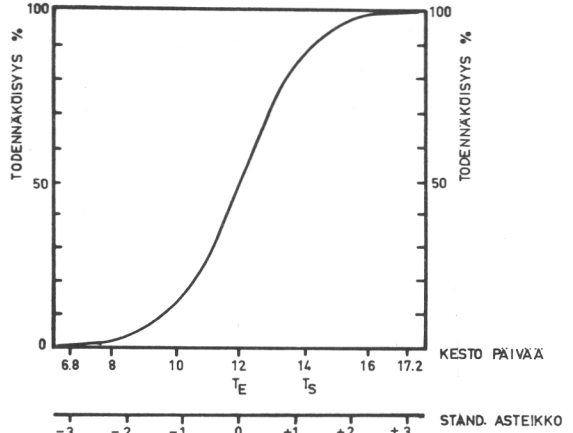
$$Z = (T_S - T_E) / \sqrt{V_{T_E}}$$

siten kuvan esimerkissä

$$Z = (14 - 12) / 1.73 = 1.16$$



Kuva 18. Projektin valmistustodennäköisyys sovittuun päivään mennessä. (Kuvan 17 projektin keston jakauma.)



Kuva 19. Kumulatiivinen normaalijakauma (kuvan 17 projektin keston jakauma).

$Z = 1.16$ ilmoittaa siis, että sovittu ajankohta, T_S on 1.16 standardipikkeamaa myöhäisempi kuin projektin todellisen valmistusajankohdan odotusarvo T_E . Tätä Z :n arvoa vastaava todennäköisyys saadaan suoraan normaalikäyrän pinta-alataulukoista (ks. esim. MODER ym. 222–225). Projektin todellisen valmistusajankohdan sattumistodennäköisyys sovittuun päivään mennessä on tässä tapauksessa 0.88, ellei ryhdytä kriittisen polun tehtävien jouduttamiseen resursseja lisäämällä.

Kun tilastollisen menetelmän laskelmat on suoritettu, voi projektin johto riskinsietokykyä perusteella harkita pitääkö ryhtyä erityisiin jouduttamistoimenpiteisiin tai onko ehkä varaa hidastaa projektin valmistumista. Tässä harkinnassa saattaa kumulatiivisen normaalijakauman käyttö olla hyvänä apuna (kuva 19).

24. Kustannusanalyysi

241. Käsitteet ja tavoitteet

Tässä luvussa siirrytään aikaisemmasta täysin staattisesta verkkosysteemistä dynaamisen verkkomallin kehittelyyn. Kysymys on tällöin yleensä kriittisen polun (polkujen) joidenkin strategisten tehtävien kestojen lyhentämisestä. *Olettaen, että työntutkimuksen on jo päästy optimaalisiin työmenetelmiin, voidaan kunkin tehtävän kestoja lyhentää vain kohdentamalla siihen lisää resursseja.* Ne voivat olla työntekijöitä (tai heidän ylityötuntejaan), koneita,

materiaalia tai tilaa joko erillisinä tai järkevinä yhdistelminä. Resurssien lisääminen vaikuttaa tehtävän kestoon siis nopeuttavasti ja tiettyyn kustannustyyppiin kohottavasti, toiseen alentavasti.

Kustannusten tyyppittely ja eri kustannuskäsitteiden tarkka määrittely riippuu yleensä laskentatilanteesta. Tässä tarkastelussa kohdistuu mielenkiinto ensi sijassa projektin valmistumiseksi tarvittavan ajan ”ostamiseen” tai ”myymiseen” t.s. keston jouduttamiseen tai hidastamiseen. Projektin koko ja laatu, siis suorite eli tuotomäärä, on jo etukäteen sovittu.

Painotettakoon erityisesti, että liiketaloustieteessä on perinnäisesti keskitetty huomio kustannuksiin tuotomäärän funktiona. Tälle pohjalle on myös rakennettu nykyisin meillä yleisesti käytetty kustannuskäsitteistö (VIRKKUNEN 11–18). Kustannusten luonne riippuu kuitenkin ennenkaikkea tarkastelunäkökulmasta (EINOLA 20). Seuraavassa tarkastellaan kustannuksia pelkästään ajan funktiona ja käsitteet määritellään tämän näkökulman mukaisesti.

Aikakustannukset aiheutuvat projektin toteutukseen vaadittavan ajan kulumisesta. Tyyppisiä aikakustannuksia ovat projektin hallintokulut sekä käyttömajauskulut. Projektin keston jatkuessa aikakustannukset kasvavat toteutavalta organisaatiolle ominaisen kustannusfunktion muodossa.

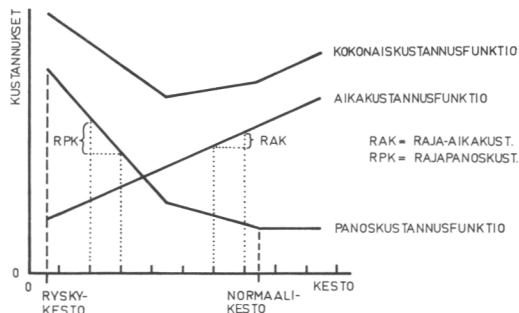
Panoskustannukset aiheutuvat projektin toteuttamiseen vaadittavien erilaisten resurssien käytöstä.

Rajakustannuksilla tarkoitetaan tässä tavanomaisesta käytännöstä poiketen sitä kustannusten muutosta, joka tapahtuu keston muuttuessa yhdellä aikayksiköllä.

Rajapanos- ja raja-aikakustannukset ovat tähän perustuvia käsitteitä.

Kokonaiskustannukset muodostuvat aika- ja panoskustannusten summasta.

Kuva 20 havainnollistaa esitettyjen eri kustannuskäsitteiden sisältöä (vrt. käsitteitä esim. EINOLA 6–21; JØRGENSEN 353–355). Voidaan todeta, että verkkosuunnittelua koskevassa kirjallisuudessa kustannuskäsitteet sivuutetaan tarkemmin määrittelemättä (ks. esim. KARLSSON 45–57; BATTERSBY 57–69; SHAFFER ym. 139–168) tai jos ne on määritelty (esim. MODER ym. 107) niin käsitteet ovat kytkeytyneet kustannustarkasteluun suoritemäärän funktiona.



Kuva 20. Esimerkki tässä tutkimuksessa käytettyjen kesto- ja kustannuskäsitteiden havainnollistamiseksi.

Tehtävän (tai projektin) *normaalikesto* on sen toteuttamiseen kuluva lyhin aika panoskustannusten ollessa minimissä.

Ryskykestolla tarkoitetaan lyhintä mahdollista kestoa, jossa projektin johto katsoo kykenevänsä projektin (tai yksittäisen tehtävän) toteuttamaan ottamalla huomioon yrityksensä voimavarat ym. rajoittavat tekijät.

Toteuttamiskelpoiset resurssiyhdistelmät ovat niitä panoskustannuskäyrän (kuva 20) pisteitä, jotka voidaan toteuttaa, ottaen huomioon käytettävien resurssien jakamattomuuden asettamat rajoitukset (esim. koneiden puoliskoja ei voida ottaa käyttöön).

Projektin valmistamisen aikataulua ei yleensä laadita sen normaalikestoa pidemmäksi. Sen sijaan on tavallista, että etenkin seuraavista syistä halutaan ohjelmoida projekti uudelleen normaalikestoa lyhyemmäksi (MODER ym. 108):

- On alunperin sovittu normaalikestoa lyhyemmästä toimitusajasta.
- Kesken toimituksen saattavat asiakkaan suunnitelmat muuttua ja hän pyytää kustannusarviota projektin keston eripituisen lyhentämisen vaikutuksista.
- Suunnittelun tavoitteena on minimoida kokonaiskustannukset.

Kustannusanalyyseissä pyritään siis yleensä lyhentämään projektin kestoa siten, että panoskustannukset nousevat mahdollisimman vähän.

242. Kustannusfunktiot

Perinnäisesti on kustannuksia yleensä tarkasteltu suoritemäärän funktiona. Seuraavassa niitä tutkitaan ajan funktiona, jolloin tarkastelu koh-

distuu erikseen aika- ja panoskustannusfunktioihin.

Aikakustannusfunktioon tarvittavat tiedot lienevät yleensä helposti saatavissa. Panoskustannusfunktioiden konstruointiin vaadittavan riittävän luotettavan kustannustietouden hankinta sen sijaan tuottaa usein vaikeuksia. Milloin aika- ja työntutkimustuloksia on tarjolla, turvaututaan niihin. Tietoja voidaan myös saada yrityksen kustannuslaskennasta tai vastaavia työnjohtajia haastatteleamalla.

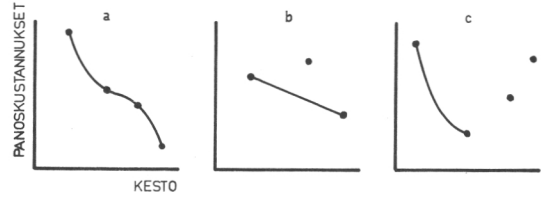
Aluksi kerätään kustannustietoja vain kriittiseen polkuun kuuluvista tehtävistä. Jos myöhemmässä vaiheessa kriittinen polku siirtyy, jatketaan kustannusarvioiden tekoa vastaavasti.

Kustannusfunktioiden etsintä lähtee toteuttamiskelpoisten panosyhdistelmien analyysistä. Tällöin on pohdittava tehtävä tehtävältä ne vaihtoehtoiset menetelmät, joilla ko. tehtävä voidaan toteuttaa tarjolla olevin resurssein ja panosyhdistelmin.

Tehtävänä saattaa olla esim. raakapuun metsäkuljetus. Kyseeseen voisi tulla ajo autolla suoraan kannolta, traktori- tai hevosajo sekä traktori-, hevos- tai vintturijuonto tai jokin niiden yhdistelmä. Perusmenetelmä valitaan maaston ym. olosuhteiden perusteella. Oletetaan hevosajon tulleen valituksi. Tarjolla on kaksi hevosta ajomiehineen. Metsäkuljetuksen valmistumisen normaalikeston (3 kk) kuluessa katsotaan aluksi riittävän. Töiden alettua kantautuu selluloosa- tehtaalta kuitenkin hälyttävä viesti: paperipuuvarastot ovat erinäisistä yhteensattumista johtuen hupenneet niin vähiin, että ollaan hätätilanteessa. Puuta on saatava tehtaalle mahdollisimman nopeasti lisää, mutta edelleen kustannusten lisäykset minimoiden.

Metsäkuljetustehtävän kesto täytyy nyt lyhentää kohdentamalla sen suorittamiseen lisäpanoksia. Voidaan hankkia lisää hevosia, mutta edellytyksenä on tällöin uuden tallin rakentaminen (tai siirto) kämpälle. Omat metsätraktorit ovat sidotut muille työmaille. Metsätraktoriurakoitsijan saanti työmaalle edellyttää normaalia korkeampien taksojen maksamista, koska töitä riittäisi vain lyhyeksi aikaa. Ajo autolla suoraan kannolta edellyttäisi suhteellisen korkeita tiekustannuksia. Näitä eri panoslajeja lisäämällä ja yhdistelemällä voidaan arvioida metsäkuljetustehtävän panoskustannusfunktio.

Oletetaan, että samanaikaisesti käynnissä olevien eri työmaiden metsäkuljetustehtävillä on samat aikakustannusfunktiot ja yhtäsuuret



Kuva 21. Toteuttamiskelpoiset resurssiyhdistelmät ja vastaavat panoskustannusfunktiot.

kaukokuljetuskustannukset. Tehtaan paperipuuvaraston vajaus tulee tällöin täytetyksi minimikustannuksin, jos eri työmaiden metsäkuljetustehtävien kestoja lyhennetään aina siellä missä rajapanoskustannukset ovat pienimmät. Näin menetellen joudutetaan tehtävien toteutusta panoksia lisäämällä kunnes kriisitilanne on ohitettu.

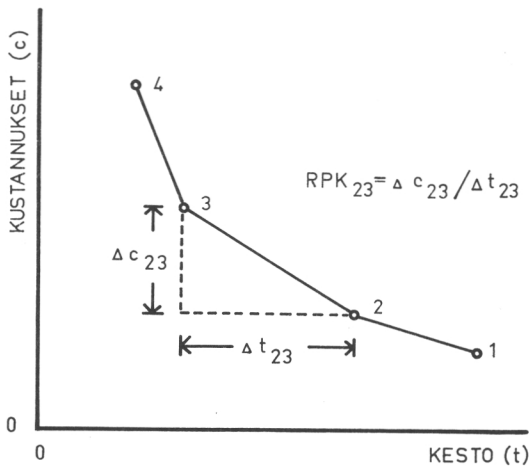
Rajapanoskustannusten saaminen edellyttää kustannusfunktioiden laatimista. Tällöin sijoitetaan kustannus-kestoakselistoon ensin kaikki ao. tehtävän toteuttamiskelpoiset panosyhdistelmät (kuva 21). Etsittyyntä funktion kuuluu aina piste, jonka kesto on lyhin. Seuraavaksi tulee mukaan edellistä lähinnä lyhimmän keston ja sitä alemman kustannuksen omaava piste. Näin menetellen kuuluvat kuvan 21 a-tapauksen kaikki pisteet ko. funktioon, tapauksessa b jää keskimäinen ja c-tapauksessa kaksi eniten oikealla olevaa pois.

Panoskustannusfunktiot voivat olla joko suora- tai käyräviivaisia (lineaarisia tai epälineaarisia). Näiden funktioiden pääominaisuus on kustannusten nousu keston lyhetyksessä. Tyypillistä on myös, että eri tehtävillä on aina jokin minimikesto, jota ei voida alittaa vaikka kuinka yrittäisiin lisätä panoksia. Vastaavasti on kestellä yläraja, jonka jälkeen kustannussäästöjä ei kyetä tekemään (ts. tehtävän suorittamiseen vaaditaan aina joitakin panoksia).

243. Kustannusten minimointi

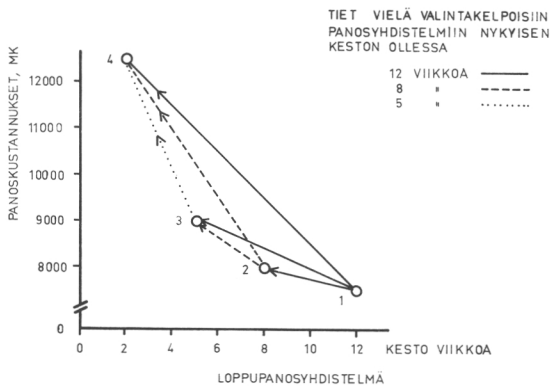
2431. "Heuristinen" menetelmä

Ensiksi pyritään määrittämään ko. tehtävän panoskustannusfunktion toteuttamiskelpoisten panosyhdistelmien rajapanoskustannukset. Etsitään kustannusmuutos aikayksikköä kohden siirryttäessä panosyhdistelmästä toiseen (kuva 22).



Kuva 22. Rajapanoskustannusten (RPK) määrittäminen.

Rajapanoskustannusten laskenta voidaan havainnollistaa äskeisellä metsäkuljetusesimerkillä (kuva 23). Eri panosyhdistelmien sisältö on siinä seuraava: 1 = kaksi hevosityksikköä, 2 = 1 + kaksi hevosityksikköä, 3 = 2 + yksi metsätraktoriyksikkö, 4 = 3 + kolme kuorma-autoyksikköä. Kuvan alareunan taulukossa on laskettu vaihtoehdot rajapanoskustannukset, siis esim. $RPK_{12} = 125$ mk ja $RPK_{23} = 333$ mk.



	2	3	4
1	$500/4 = 125$	$1500/7 = 214$	$5000/10 = 500$
2		$1000/3 = 333$	$4500/6 = 750$
3			$3500/3 = 1167$

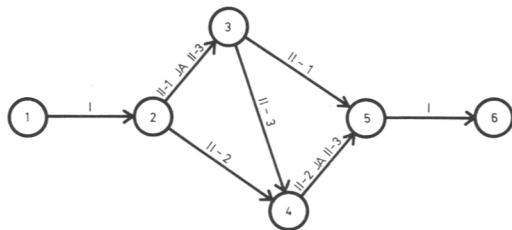
Kuva 23. Luvun 242 metsäkuljetusesimerkin rajapanoskustannusten laskenta.

Pyrittäessä koko projektin keston lyhentämiseen minimikustannuksien on lähtökohdaksi otettava projektin normaali-kesto. Ensimmäinen lisäpanos (tai - yhdistelmä) kohdistetaan siihen kriittiseen tehtävään, jonka rajapanoskustannus on pienin. Sitten tehdään uusi aika-analyysi, jonka tuloksena koko projektille saadaan uusi lyhennetty kesto. Tarkistetaan pelivarojen ja siten kriittisen polun mahdolliset muutokset. Menettely toistetaan kunnes haluttu koko projektin keston on saavutettu.

Milloin toimintaverkko sisältää kaksi tai useampia kriittisiä polkuja on menettely edellistä hieman mutkikkaampi, joskin periaatteessa sama. Kriittiset tehtävät jaetaan ensin kahteen ryhmään kuvan 24 mukaisesti siten, että I-ryhmään luetaan tehtävät, jotka ovat yhteisiä kaikille kriittisille poluille.

Ryhmän I tehtäviä voidaan käsitellä kuten yhden kriittisen polun tapausta edellä. Sen sijaan koko projektin keston lyhentämiseksi tapahtumien 2 ja 5 välillä (kuva 24) tulee etsiä jokaisesta kolmesta kriittisestä polusta (2-3-5, 2-4-5 ja 2-3-4-5) tehtävä, jonka rajapanoskustannus on pienin. Jos näiden kolmen tehtävän rajapanoskustannusten summa alittaa I-ryhmän pienimmän rajapanoskustannuksen, kohdennetaan lisäpanokset niihin, muutoin ko. I-ryhmän tehtävään. Muutoin on menettely sama kuin yhden kriittisen polun tapauksessa.

Erytyistä huomiota on kiinnitettävä tapauksiin, joissa lisäpanosten kohdentamisen seurauksena kriittinen polku siirtyy. Jos tällöin lisäpanoksen aiheuttama tehtävän keston lyhennys on suurempi kuin ko. pelivara, on tältä samalta, siis entiseltä kriittiseltä polulta etsittävä jokin tehtävä, josta voitaisiin vähentää panos tai panoksia siten, että ko. polku ei tulisi uudelleen kriittiseksi, mutta että kustannusvähennys olisi mahdollisimman suuri.



Kuva 24. Useampia (tässä 3) kriittisiä polkuja käsittävän verkon tehtävien ryhmittely kustannusanalyysia varten (MODER ym. 118).

Edellä on hahmoteltu erään kustannusten minimointimenetelmän pääpiirteet (MODER ym. 114–122; BATTERSBY 60–64). Se ei aseta kustannusfunktion muotoon nähden rajoituksia, mutta ei toisaalta anna täysin yksityiskohtaisia menettelyohjeita, joten ei voida olla varmoja optimaaliseen tulokseen pääsemisestä. Menetelmä onkin juuri tämän vuoksi otsikoitu tässä heuristiseksi (ks. esim. VÄISÄNEN 1966).

2432. CPM-menetelmä

CPM-menetelmä on kustannusfunktiorajoituksiltaan ehdoton. Koko panoskustannusfunktio edellytetään lineaariseksi, tai että se voidaan tehokkaalla tavalla ja riittävän luotettavasti estimoida pala palalta lineaariseksi. Olettamuksena on myös, että panoksia voidaan yhdistellä eri suhteissa toisiinsa normaali- ja ns. ryskykeston (crash duration) välillä. Vain joko täysin suorat tai koverat funktiot ovat sallittuja (kuva 25).

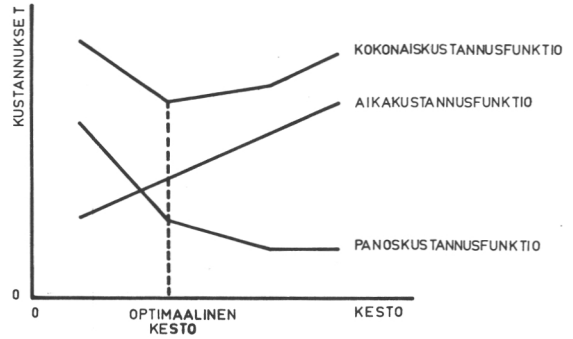
Tapauksessa a on ko. tehtävälle olemassa vain yksi toteuttamiskelpoinen panosyhdistelmä. Kuvan b-tehtävä voidaan toteuttaa joko normaali- tai ryskykeston johtavalla panosyhdistelmällä tai millä tahansa niiden kombinaatiolla. Tilanne on sama c-tapauksessa.

Heuristisessa menetelmässä aloitettiin kustannusanalyysi aina normaalikestolla laaditusta aika- ja kustannusohjelmasta. CPM-menetelmässä voidaan laskentaan ryhtyä joko normaali- tai ryskykeston (ks. s. 20) päästä. Laskenta perustuu tässä tehokkaisiin algoritmeihin, joita noudattamalla päästään panoskustannusten ehdotomaan minimiin kulloinkin halutulla kesto- vaihtoehdolla. Menettely on helppo ohjelmoida myös tietokoneille.

Tietokoneohjelmoitu CPM-menetelmä on todella tehokas keino kustannusten minimoinnissa, kunhan vain kustannusfunktioedellytykset voidaan täyttää. Sen käyttö on usein pie-



Kuva 25. CPM-menetelmän sallimat panoskustannusfunktion mallit (SHAFFER ym. 148).



Kuva 26. Projektin kokonaiskustannukset minimoiva optimaalinen kesto.

nekköjenkin verkkojen analyysissa heuristisen menetelmän käyttöä edullisempaa. (MODER ym. 129; CPM-menetelmän algoritmit, ks. SHAFFER ym. 142–166.)

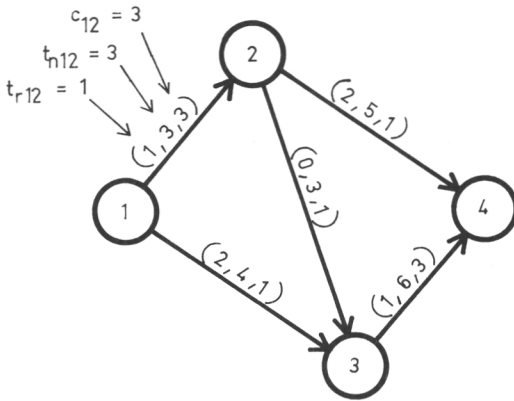
2433. Kokonaiskustannusten minimointi

Kahdella edellä selostetulla menetelmällä voidaan siis minimoida panoskustannusten lisäykset kaikille toteutettavissa oleville koko projektin kesto- vaihtoehdoille ryskykestosta normaalikeston saakka. Koko projektin aikakustannusfunktio on toisaalta yleensä helposti konstruoitavissa. Panos- ja aikakustannusfunktioiden summa esittää kokonaiskustannusfunktioita (kuva 26). Tämän funktion minimikohtaa vastaava kesto on etsitty kokonaiskustannukset minimoiva kesto.

244. Ohjelmointimenetelmien sovellutus

2441. Kriittisen polun etsintä

Kuvan 27 toimintaverkkoon on joka tehtävälle merkitty kolme numeroa, jotka tarkoittavat ryskykestoa (t_{rij}), normaalikestoa (t_{nij}) ja rajapanoskustannusta (c_{ij}). Aluksi oletetaan projekti ajoitetuksi siten, että sen kaikki tehtävät toteutetaan niiden normaalikestojen kuluessa. Voidaan osoittaa, että sekä kriittisen polun etsintä että panoskustannusten minimointiongelma kyetään muotoilemaan lineaarisen ohjelmoinnin erään haarauman ns. kokonaislukuohjelmoinnin (integer programming) problemaksi.



Kuva 27. Esimerkki toimintaverkosta, jonka jokaiselle tehtävälle on merkitty ryskykesto (t_{rij}), normaali-kesto (t_{nij}) sekä rajapanoskustannus (c_{ij}) (MODER ym. 136).

Toimintaverkko kuvitellaan virtaverkoksi, jossa hypoteettinen virtayksikkö kuljetetaan alkutapahtumasta (1) välitapahtumien (2, 3) kautta päätetapahtumaan (4). Kunkin tehtävän ($i-j$) kesto (y_{ij}) ja kustannus (t_{ij} ; c_{ij}) ymmärretään syntyvän ko. virtayksikön kuljettamisesta tapahtumasta i tapahtumaan j .

Kuvan 27 kriittisen polun löytämiseksi kokonaislukuohjelmointia käyttäen muodostetaan seuraava ongelman asettelu (primaaliprobleema), jossa käytetyt keston yksiköt oletetaan kokonaislukuiksi.

Tavoitefunktio:

$$\text{maksimoi } f [Y] = 3y_{12} + 4y_{13} + 3y_{23} + 5y_{24} + 6y_{34} \quad (a)$$

seuraavien rajoitusten vallitessa:

$$y_{12} + y_{13} = 1 \quad (b)$$

$$-y_{12} + y_{23} + y_{24} = 0 \quad (c)$$

$$-y_{13} - y_{23} + y_{34} = 0 \quad (d)$$

$$-y_{24} - y_{34} = -1 \quad (e)$$

$$y_{ij} \geq 0$$

Rajoitusyhtälöt b ja e osoittavat siis, että tietty virtayksikkö lähtee alkutapahtumasta 1 ja saapuu samankokoisena lopputapahtumaan 4. Yhtälö c taas merkitsee sitä, että tapahtumaan 2 tuleva virta (y_{12}) on yhtä suuri kuin siitä lähtevien virtojen (y_{23} , y_{24}) summa. Tapahtumaa 3 koskeva, edellistä (c) vastaava rajoitus on yhtälössä d. Täten siis jokainen y_{ij} -yhdistelmä, joka tyydyttää nämä yllä esitetyt rajoitukset,

muodostaa polun alkutapahtumasta lopputapahtumaan.

Tavoitefunktio $f [Y]$ antaa koko projektin keston kulloinkin valitulle polulle. Kun tavoitefunktio maksimoidaan, löydetään toimintaverkon kriittinen polku. Probleema on ratkaistavissa esim. lineaarisen ohjelmoinnin peiliteoreemaa (duaaliteoreema) soveltaen.

Saadaan peiliongelman asettelu.

Tavoitefunktio:

$$\text{minimoi } g [W] = w_1 - w_4 \quad (f)$$

seuraavien rajoitusten vallitessa

$$w_1 - w_2 \geq 3 \quad (g)$$

$$w_1 - w_3 \geq 4 \quad (h)$$

$$w_2 - w_3 \geq 3 \quad (i)$$

$$w_2 - w_4 \geq 5 \quad (j)$$

$$-w_3 - w_4 \geq 6 \quad (k)$$

$$-\infty < w_i < +\infty$$

Rajoitusepäyhtälöt voidaan kirjoittaa muotoon:

$$w_2 \leq w_1 - 3, \text{ jos } w_1^+ = 0, \text{ niin } w_2^+ = -3 \quad (gg)$$

$$w_3 \leq w_1 - 4 \quad \text{---} \quad w_3^+ = -6 \quad (hh)$$

$$w_3 \leq w_2 - 3 \quad \text{---} \quad w_3^+ = -6 \quad (ii)$$

$$w_4 \leq w_2 - 5 \quad \text{---} \quad w_4^+ = -12 \quad (jj)$$

$$w_4 \leq w_3 - 6 \quad \text{---} \quad w_4^+ = -12 \quad (kk)$$

Asetelmasta nähdään, että w_4 vaihtelee w_1 :lle annetun arvon mukaisesti. Koska $g [W]$ on pelkkä w_1 :n ja w_4 :n erotus, voidaan w_1 :lle antaa vaihtoehtoisia arvoja vaikuttamatta $g [W]$:n arvoon. Tähän perustuen on yllä merkitty $w_1 = 0$ ja sitten ratkaistu w_2 , w_3 ja w_4 . Jotta tavoiteyhtälö ($g [W] = w_1 - w_4$) minimoitaisiin, tulee nyt siis minimoida w_4 siten, että samanaikaisesti tyydytetään asetetut rajoitukset. Etsitty tavoitefunktion minimiarvo on siten $g [W] = w_1 - w_4 = 0 - (-12) = 12$.

Esitetystä asetelmasta havaitaan, että yhtälöt (hh) ja (jj) toteutuvat (arvolla $w_1 = 0$) epäyhtälöinä. Tällöin voidaan peiliteoreemaan perustuen päätellä, että primaaliprobleeman tavoitefunktion toinen ja neljäs muuttuja ovat nollija, siis $y_{13} = y_{24} = 0$, kun taas muiden muuttujien täytyy olla etumerkiltään positiivisia. Sijoittamalla $y_{13} = y_{24} = 0$ primaaliprobleeman rajoitaviin yhtälöihin saadaan:

$$Y^+ = (y_{12}^+, y_{13}^+, y_{23}^+, y_{24}^+, y_{34}^+) = (1, 0, 1, 0, 1)$$

ja siten

$$f [Y^+] = 3 \times 1 + 4 \times 0 + 3 \times 1 + 5 \times 0 + 6 \times 1 = 12$$

Näin siis kyettiin osoittamaan, että toimintaverkon kriittinen polku 1 - 2 - 3 - 4 ja sen kesto = 12 saatiin ratkaistuksi lineaarista ohjelmointia (MODER ym. 135-139; lineaarisen ohjelmoinnin alkeet, ks. esim. VÄISÄNEN 1966 tai GEARY ym.) soveltaen.

2442. Panoskustannusten minimointi

Oletetaan aluksi, että kuvan 27 toimintaverkon jokaisen tehtävän panoskustannusfunktio on samaa muotoa kuin kuvassa 28. Jos y_{ij} tarkoittaa siinä tehtävän $i-j$ ohjelmoitua kestoa, voidaan kirjoittaa:

$$C_{ij} = C_{y_{ij}} + c_{ij} y_{ij};$$

$$C_{y_{ij}} = C_{ij} - c_{ij} y_{ij}$$

Koko projektille saadaan vastaavasti:

$$\sum C_{y_{ij}} = \sum C_{ij} - \sum c_{ij} y_{ij}$$

Koska C_{ij} :t ovat vakioita, niin tulevat koko projektin panoskustannukset ($\sum C_{y_{ij}}$) minimoiduksi maksimoimalla tavoitefunktio:

$$f [Y] = \sum c_{ij} y_{ij} \quad (a)$$

seuraavien rajoitusten vallitessa:

$$TA_i + y_{ij} - TA_j \leq 0, \quad (i = 1, 2, 3; j = 2, 3, 4) \quad (b)$$

$$y_{ij} \leq t_{nij}, \quad \text{---} \quad (c)$$

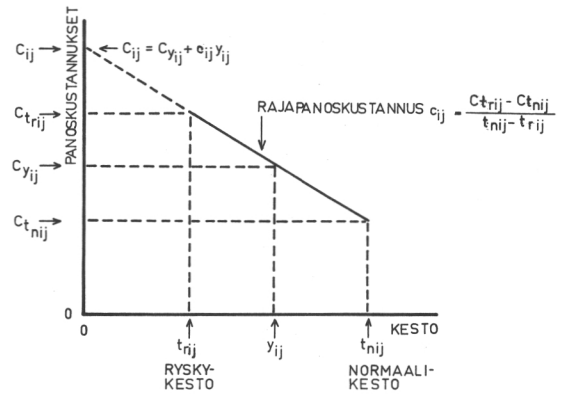
$$-y_{ij} \leq -t_{rij}, \quad \text{---} \quad (d)$$

$$TA_4 - TA_1 \leq t_e$$

TA_k :t ovat riippumattomia muuttujia tarkoitetaan tapahtumien 1, 2, 3 tai 4 aikaisimpia ajankohtia. Vakiorajoitus t_e esittää koko projektin keston odotusarvoa tai $t_e = TA_4 - TA_1$. Jos merkitään jo sovelletun käytännön mukaan $TA_1 = 0$, tarkoittaa t_e silloin tapahtuman 4 aikaisinta ajankohtaa. Yhtälö (e) supistuu nyt muotoon $TA_4 \leq t_e$.

Ensimmäinen rajoitusepäyhtälö (b) voidaan saattaa muotoon $TA_j - TA_i \geq y_{ij}$. Jokaisen tehtävän ($i-j$) pääte- ja alkutapahtuman erotuksen tulee olla siis vähintään ko. tehtävän ohjelmoidun keston (y_{ij}) suuruinen. Kuva 28 täsmentää yhtälöissä esiintyvien symbolien merkityksen. Vaihtamalla etumerkki saadaan epäyhtälöstä (d) : $y_{ij} \geq t_{rij}$ eli siis kunkin tehtävän keston tulee olla vähintään ryskykeston mittainen tai sitä suurempi.

Muuttujat TA_k on jätetty pois edellisestä tavoitefunktioista (a), koska niiden kustannuskerroimet = 0. Edellä kohdissa a-e esitetty lineaarisen ohjelmoinnin ongelman asettelu on nähtävissä täydellisenä taulussa 2 (s. 26).



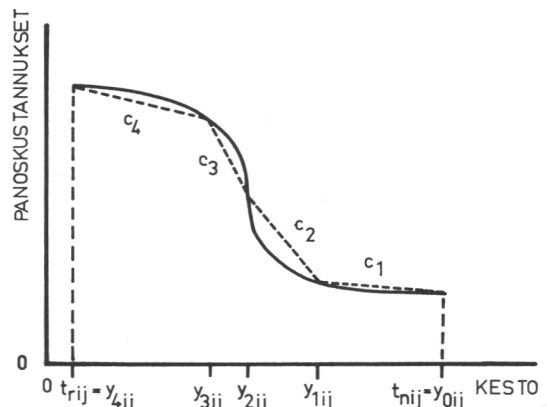
Kuva 28. Yksinkertainen panoskustannusfunktio.

Tämän luvun alussa oletettiin kaikki panoskustannusfunktiot täysin lineaarisiksi. Ne saattavat olla kuitenkin usein joko koveria tai kuperia tai osaksi molempia, kuten kuvassa 29. Lineaarista ohjelmointia voidaan soveltaa panoskustannusten minimointiin funktion muodosta riippumatta. Jos panoskustannusfunktio on käyräviivainen, estimoidaan se "pala palalta" lineaariseksi esim. kuvan 29 mukaisesti. Jos siis esim. tehtävän $i-j$ panoskustannusfunktio olisi lineaarinen, olisi maksimoitava $c_{ij} y_{ij}$. Kun se on käyräviivainen on edellisen sijasta maksimoitava tavoitefunktio

$$f [Y] = c_{1ij} y_{1ij} + c_{2ij} y_{2ij} + c_{3ij} y_{3ij} + c_{4ij} y_{4ij}$$

Rajoituksiin on luonnollisesti tehtävä vastaavat muutokset (MODER ym. 141-144).

Panoskustannusten minimointi voidaan siis yleensä suorittaa lineaarista ohjelmointia käyttäen. Tällöin joudutaan useimmiten turvautu-



Kuva 29. Panoskustannusfunktio, joka on aluksi kuperia ja lopuksi kovera.

Taulu 2. Lineaarisen ohjelmoinnin sovellutus kustannusten minimointiongelmaan. Primaaliprobleeman muotoilu (MODER ym. 142).

$$\begin{aligned} \text{Maksimoi } f [Y] &= \sum c_{ij} y_{ij} \\ &= c_{12} y_{12} + c_{13} y_{13} + c_{23} y_{23} + c_{24} y_{24} + c_{34} y_{34} \end{aligned}$$

seuraavien rajoitusten vallitessa

TA ₁	TA ₂	TA ₃	TA ₄	y ₁₂	y ₁₃	y ₂₃	y ₂₄	y ₃₄	≤ Rajoitus
1	-1			1					≤ 0
1		-1			1				≤ 0
	1	-1				1			≤ 0
	1		-1				1		≤ 0
		1	-1					1	≤ 0
				1					≤ t _{n12}
					1				≤ t _{n13}
						1			≤ t _{n23}
							1		≤ t _{n24}
								1	≤ t _{n34}
				-1					≤ -t _{r12}
					-1				≤ -t _{r13}
						-1			≤ -t _{r23}
							-1		≤ -t _{r24}
								-1	≤ -t _{r34}
-1			1						≤ t _e

maan ongelman ratkaisussa simplexmenetelmään (GEARY ym. 33–34). Sujuakseen vaivatonta tämä puolestaan edellyttää tietokoneen käyttöä.

2443. Verkkovirtamenetelmä

Panoskustannusten minimointiongelmaan on tarjolla tehokas verkkovirtateoriaan perustuva ratkaisumenetelmä, jos panoskustannusfunktion muodolle asetetaan seuraavat rajoitukset. Sen tulee olla jatkuva, kovera ja laskeva, kuten funktion kovera osa (välillä $c_1 - c_2$) kuvassa 29. Tarkastellaan sellaisen projektin toimintaverkkoa, jonka tehtäville on asetettu kapasiteettirajoitukset ($d_{ij} \geq 0$). Tavoitteena on maksimoida virta alkutapahtumasta lopputapahtumaan. Tapahtumien i ja j välisen virran y_{ij} täytyy silloin tyydyttää rajoitus:

$$0 \leq y_{ij} \leq d_{ij}$$

Tehtävän ($i-j$) virtaa (y_{ij}) voidaan lisätä millä

tahansa määrällä annetun kapasiteettirajoituksen (d_{ij}) puitteissa. Maksimilisäys eli ”liikkakapasiteetti” (e_{ij}) määräytyy siten seuraavasti:

$$e_{ij} = d_{ij} - y_{ij}$$

Jos merkitään alkutapahtuma = 1 ja lopputapahtuma = N, saadaan seuraava lineaarisen ohjelmoinnin asetelma:

$$\text{Maksimoi } f [Y] = \sum_r y_{1r} = \sum_s y_{sN} \quad (a)$$

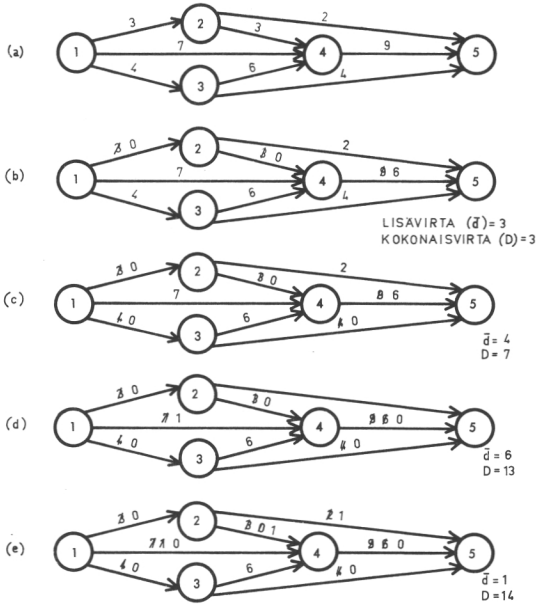
seuraavin rajoituksin

$$\sum_s y_{si} = \sum_r y_{ir} ; i = 2, \dots, N-1 \quad (b)$$

$$0 \leq y_{ij} \leq d_{ij} \quad (c)$$

Tavoitefunktiossa pyritään siis löytämään koko toimintaverkon maksimivirta, joka on yhtäsuuri kuin alkutapahtumasta lähtevä ja lopputapahtumaan saapuva kokonaisvirta.

Tarkastellaan kuvan 30 a-kohdan verkkoa. Siinä on numeroin esitetty kunkin tehtävän virtakapasiteetti (d_{ij}), siis esim. $d_{24} = 3$. Pyritäessä ratkaisemaan ongelma verkkovirta-algoritmia (MODER ym. 150–152) noudattaen edetään seuraavasti:



Kuva 30. Verkkovirta-algoritmin mukainen vaiheittainen iterointi (MODER ym. 149).

Vaihe 1: Lähtien alkutapahtumasta kuljetaan eteenpäin positiivisen kapasiteetin omaavia tehtäviä lopputapahtumaan saakka. Luetteloidaan kuljetun polun eri tehtävien kapasiteetit ja merkitään pienin kapasiteetti = \bar{d} . Koska koko polun virta voi olla korkeintaan = \bar{d} , niin vähentämällä \bar{d} kunkin tehtävän kapasiteetista, saadaan vastaavat liikakapasiteetit.

Vaihe 2: Toistetaan vaihe 1:n mukaista menettelyä, kunnes kaikki mahdolliset polut alkutapahtumasta lopputapahtumaan on kuljettu, eikä yhdelläkään polulla ole enää positiivista kapasiteettia. Kun kunkin polun eri tehtävien pienimmät kapasiteetit (\bar{d}_{ij}) summataan saadaan tulokseksi koko verkon maksimivirta. Toteutet-

taessa vaihetta 2 on virta väärään suuntaan (kuvassa siis vasempaan) sallittu niin pitkälle kuin nettovirta pysyy positiivisena. Jos siis y'_{ij} ja y'_{ji} merkitsevät saman tehtävän samanaikaisia, mutta eri suuntaisia virtoja, silloin nettovirta y_{ij} on

$$d_{ij} \geq y_{ij} = y'_{ij} - y'_{ji} \geq 0, \text{ sekä } y'_{ij} \geq y'_{ji}$$

Soveltamalla edellä selostettua verkkovirta-algoritmia kuvan 30 verkkoon saadaan esim. seuraavan taulun osoittamat iteroinnit. Eri polkujen iterointijärjestyksellä ei ole lopputuloksen kannalta merkitystä. Maksimivirta (= 14) on riippumaton iterointijärjestyksestä (MODER ym. 148–150).

Aiemmin taulussa 2 esitetty panoskustannusten minimoinnin primalprobleema voidaan muuttaa lineaarisen ohjelmoinnin sääntöjen mukaan dualprobleemaksi. Tämän ongelman ratkaisuun voidaan tehokkaasti soveltaa edellä esitetystä verkkovirta-algoritmista vielä pidemmälle kehitettyä menettelyä (MODER ym. 152–163).

25. Resurssianalyysi

Resurssianalyysissä saattaa ongelman asettelu olla kahdenlainen. Jos koko projektin kesto on annettu, pyritään analyysillä tasoittamaan erilaisten panosten käyttöä. Toisaalta voi olla annettuna rajoitettu määrä strategisia resursseja, kuten esim. metsätraktoreita, kuorimakoneita, työnohtajia jne. Tällöin on ongelmana koko projektin keston minimointi em. rajoitusten puitteissa. Viimeksi mainittu ongelman asettelu lienee metsällisissä projekteissa yleisempi.

Jos resurssianalyysin ongelmana on minimoida kesto tietyin resurssirajoituksin, tarvitaan seuraavat perustiedot:

- Projektin normaali toimintaverkko
- Aika-analyysin tulokset

Taulu 3. Eräs käyttökelpoinen iterointijärjestys maksimaalisen nettovirran löytämiseksi kuvan 30 verkolle (MODER ym. 150).

Iterointi	Polku	\bar{d}	Kuvan n:o
1	1 – 2 – 4 – 5	3	b
2	1 – 3 – 5	4	c
3	1 – 4 – 5	6	d
4	1 – 4 – 2 – 5	1	e
	Maksimivirta =	14	

- c) Kunkin tehtävän vaatimat eri resurssien määrät, esim.

Halutun keston vaatimat eri resurssien määrät

Tehtävä	Kesto	Työnjoht.	Apu-miehiä	Aurausyksik.	Kaivukon.
A-ojaverkon suunnittelu	20	2	6	—	—
B-ojien kaivu	90	1	5	2	3

- d) Käytettävissä olevien eri resurssien enimmäismäärät, esim.

Resurssi	Käytettävissä enintään
Työnjohtajia	2
Apumiehiä	100 (ei rajoituksia)
Aurausyksiköitä	2
Kaivukoneita	4

Jos d-kohdan rajoituksissa tapahtuu muutoksia ennen projektin valmistumista, on analyysi luonnollisesti tehtävä uudestaan vastaavilta osiltaan. Eri resurssija tulee olla käytettävissä ainakin niin paljon, että vähintään yhtä projektin tehtävää voidaan vuorollaan toteuttaa.

Esitetyn tyyppisen ongelman analysointi ilman tietokoneita on melkoisen työläs heti, kun tehtävien luku nousee muutamaankymmeneen. Tosin jo pelkkä aikamittakaavaan piirretyn toimintaverkon ja sen eri tehtävien pelivarojen ylimalkainen tarkastelu saattaa antaa hyviä vihjeitä eri panoslajien kohdentamisesta.

Ilman tietokoneita sovellettavilla resurssianalyysialgoritmeilla voidaan yleensä käsitellä vain yhtä resurssia kerrallaan (MODER ym. 83–106; BATTERSBY 74–84). CPM-menetelmässä on luovuttu tavanomaisesta tehtävä – nuolesta, tapahtuma – ympyrässä toimintaverkosta ja siirrytty resurssianalyysissä tehtävä – ympyrässä, tapahtuma – nuolesta verkkoon (SHAFFER ym. 97–106). Tätä lohkovertkkotekniikkaa on yleisesti suositeltu verkkosuunnittelussa käytettäväksi etenkin jos verkossa on monia samanaikaisesti suoritettavia tehtäviä, joiden aloittamiset ja lopettamiset ovat toisistaan riippuvaisia (ks. luku 212).

Kun projektin alustavan toimintaverkon tarkastelu osoittaa, että jonakin ajankohtana projektin eri tehtävien toteutus vaatisi tiettyä resurssia enemmän kuin sitä tuolloin on käytettävissä, on tarkoituksenmukainen resurssianalyysi tarpeen. Tällöin pyritään määrättyihin kriteereihin nojautuen strategisten resurssien

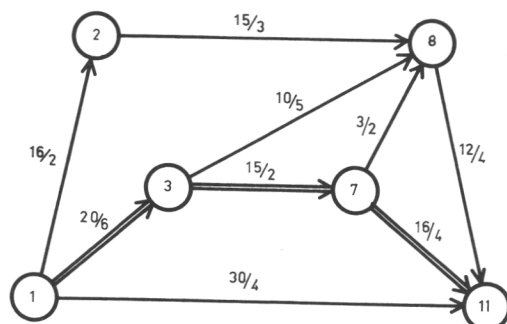
optimaaliseen kohdentamiseen projektin eri tehtäville.

Optimointiin tähtävään analyysin kannalta on keskeistä kuinka em. kriteerit valitaan. Päätös kriteerien valinnasta on syytä tehdä erikseen kullekin projektille. Joskus saattaa riittää pelkkä ko. tehtävien asettaminen järjestykseen pelivaran mukaan. Rajoittavat resurssit kohdennetaan ensin tehtäville, joilla on pienimmät pelivarat. Usein on varmaan aiheellista käyttää projektin luonteen kannalta tarkoituksenmukaista pelivaran painotusmenetelmää. Painoina tulevat ensisijaisesti kyseeseen vastaavat rajakustannukset.

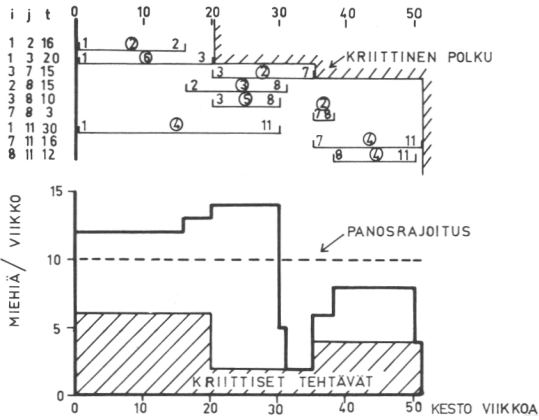
Rajoittavien resurssien ongelmassa kehitetään resurssianalyysillä uusi toimintaverkko, joka on ajoitettu niin, että sen tehtävät voidaan toteuttaa kulloinkin käytettävissä olevin resurssein ja että koko projektin keston lisäys on samalla minimoitu.

Yksityiskohtaisena esimerkkinä resurssianalyysistä tarkastellaan kuvaa 31. Siinä olevaan toimintaverkkoon on merkitty kunkin tehtävän kohdalle vastaava kesto viikkoina ja resurssivaatimus miesten lukumääränä.

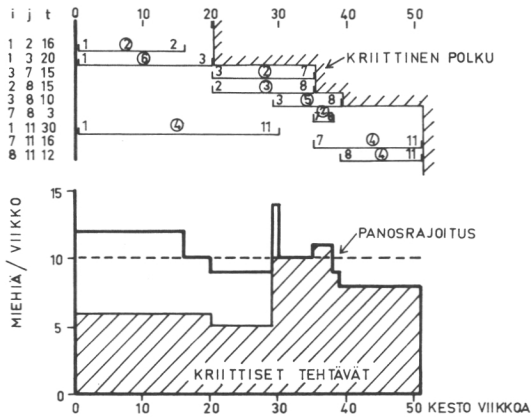
Muunnetaan esitetty verkko Ganttin jana-diagrammin muotoon (LOCKYER 59–68; KIRMO 24). Muunnos nähdään kuvan 32 yläosassa. Oikealla oleva varjostettu porrastus osoittaa siinä kriittisen polun (1 – 3 – 7 – 11). Kutakin tehtävää esittää omalle kohdalleen aikamittakaavaan piirretty jana, jonka alussa on vastaavan alkutapahtuman ja lopussa ko. lopputapahtuman numero sekä keskellä ”rengastettuna” tehtävän resurssivaatimus. Kaaviosta nähdään helposti koko projektin resurssivaatimus kunkin ajankohtana laskemalla yhteen ao. viikon käynnissä olevien tehtävien resurssivaatimukset.



Kuva 31. Tehtäväkohtaisiin kestoiin ja resurssivaatimuksiin (työmiehet) varustettu toimintaverkko.



Kuva 32. Kuvan 31 verkon resurssianalyysin alkutilanne Ganttin janadiagrammin ja histogrammin muodossa (LOCKYER 77).



Kuva 33. Kuvan 31 verkon resurssianalyysin lopputilanne (LOCKYER 80).

Oletetaan, että projektin eri tehtävissä samanaikaisesti työskenteleviä miehiä ei voida vaihtaa tehtävästä toiseen ja että tehtäviin sopivia miehiä on tarjolla vain 10. Kuvan 32 alaosaan on piirretty histogrammi, joka selkeästi osoittaa tilanteen projektin resurssivaatimusten ja -rajoituksen suhteen eri viikkoina.

Kuvan 32 histogrammin paljastama tilanne on projektin johdon kannalta hälyttävä. Projektin panosvaatimushan ylittää 30 viikon ajan panosrajoituksen. Ellei tilannetta pystytä korjaamaan, päädytään sovitun projektin valmistumispäivän ylitykseen. Samasta histogrammista selviää kuitenkin, että projektia toteutetaan viimeiset 21 viikkoa "vajaakapasiteetilla". Tunntuisi siis järkevältä yrittää tasoittaa panosten

käyttöä siirtämällä alkupään kuormitusta myöhemmäksi.

Eri tehtävien pelivarat voidaan tutkia tarkastelemalla Ganttin kaaviota (kuva 32). Analysoidaan jokaisen pelivaran omaavan tehtävän aloituksen siirtämisen vaikutus resurssivaatimusten tasoittumiseen. Tällöin päädytään tehtävien 8–11, 3–8 ja 2–8 alkamisajankohdan siirtämiseen. Näillä muutoksilla aikaansaatu kuormituksen tasoitusvaikutus nähdään kuvan 33 histogrammissa. Jos tarkastelun kriteerinä pidetään resurssirajoituksen ylityksen minimointia, on kuvan 33 janadiagrammin esittämä tehtävien toteutusjärjestys paras. Sitä noudattamalla kyetään siis minimoimaan projektin sovitun valmistumispäivän viivästymä.

Projektin resurssianalyysia on edellä käsitelty sen alkeellisimmassa muodossa. Projektin koon kasvaessa sekä useiden ja vaihtoehtoisten resurssien ollessa käytettävissä monimutkaistuu edellä kuvailtu resurssien kuormitusongelma. Tarvitava suuri tietomäärä, käyttökelpoisten resurssiyhdistelmien lukuisuus sekä jatkuvista suunnittelutilanteen muutoksista aiheutuva laskelmien uudistamisen tiheys tekevät tietokonelaskennan lähes välttämättömäksi.

Esimerkiksi tiettyjen resurssirajoitusten vallitessa kuormittaa ASTRA-DISC-ohjelma resurssit eri tehtävien kesken sekä ajoittaa tehtävät siten, että projektin kesto minimoituu. Käytettävissä on kaksi ominaisuusiltaan hieman poikkeavaa algoritmia. Ohjelma käsittelee nuoliverkkoja. (Projektinvalvonta-...).

Luvussa 24 aloitettua eri tehtävien suoritusvaihtoehtojen etsintää on jatkettu tässä luvussa resurssien kuormituksen osalta. Molemmat luvut liittyvät kuvan 0 (s. 8) lohkon D aihepiiriin. Projektin toimintaverkko on suunnittelun kohdesysteemin malli. Sitä on mahdollista käyttää myös kyseisen systeemin simulointimallina, jolloin esimerkiksi puun korjuussa välttytään eri korjuuketjujen kenttäkokeilta, jos kustakin jo on simulointiin riittävä informaatio käytettävissä. Simuloinnilla kyettäisiin ilmeisesti tehokkaasti ratkaisemaan monimutkaisiakin resurssien kuormitusongelmia (vrt. BATTERSBY 119).

26. Tietokonelaskenta

PERT-menetelmä luotiin valtavien ohjusprojektien kehittämistyön yhteydessä. Eri tietokoneyhtiöt olivat vahvoin panoksin mukana verk-

kosuunnittelumenetelmien kehittämissä jo niiden alkutaipaleella USA:ssa. Tässä ovatkin ilmeisesti kaksi pääsyä siihen yleiseen käsitykseen, että verkkosuunnittelua kannattaa harkita sovellettavaksi vain laajoihin projekteihin ja että verkkosuunnittelu aina edellyttää tietokoneiden käyttöä.

Verkkosuunnittelumenetelmää on kuitenkin sovellettu menestyksellä myös suppeahkoihin projekteihin turvautumalla ”käsineläskentään”. Monesti jo pelkkä pienen projektin perinpohjainen analysoiminen ja toimintaverkon piirtäminen näkyviin saattaa säästää suunnittelijan myöhäisemmiltä yllätyksiltä. Karkeana ohjeena on esitetty, että milloin verkossa on alle sata tehtävää tullaan vielä toimeen kannattavasti ”käsimenetelmän” (BATTERSBY 129; KIRMO 26).

Vaikka verkon tehtäväluvulla onkin pääpaino tietokoneeläskentää harkittaessa, on ennen päätöksentekoa syytä tutkia myös seuraavat näkökohdat (MODER ym. 240):

- Verkkosuunnitteluohjelmin varustetun tietokonekapasiteetin tarjonta ja hinta.
- Odotettavissa oleva verkkosuunnitteluläskelmien tarkistustiheys.
- Kuinka monipuolisia verkkosuunnitteluläskelmiä on tarkoitus suorittaa, siis tyydytäänkö vain tavalliseen aika-analyysiin vai lasketaan myös kustannus- ja resurssianalyysi jne.
- Missä muodossa läskentätulokset halutaan.

Tietokoneiden käytöllä verkkosuunnitteluläskelmissä katsotaan voitavan saavuttaa seuraavia etuja ”käsineläskentään” verrattuna (SHAFER ym. 180):

- Läskentätyö nopeutuu ja halpenee.
- Virheriski pienenee.
- Tehtävien erittelyssä ei epäröidä mennä riittävän yksityiskohtaiseen jakoon (”käsineläskennassa” pidetään aina tehtäviä yksilöittäessä mielessä läskutyön suuritöisyys).
- Tietokone vapauttaa suunnitteluhenkilökunnan rutiiniläskentätöistä ja suo siten mahdollisuuden keskittyä entistä huolellisemmin toimintaverkon rakentamiseen ja läskentätulosten analysointiin.

Luetteloon voidaan lisätä vielä tulostustapojen runsaus.

Ennen tietokoneeläskentään siirtymistä on tarkoin selvitettävä mitä tietokoneohjelma todella läskee. Usein hyödyllinen varokeino on, että läsketään osa tietokoneelle syötettäväksi

tarkoitettusta aineistosta ”käsini” ja verrataan molemmin tavoin saadut tulokset.

Valintapäätös tarjolla olevien tietokoneohjelmien suhteen tulee perustua niiden eri ominaisuuksien huolelliseen punnintaan. Seuraavassa esitetään eräitä keskeisiä näkökohtia verkkosuunnittelumenetelmään kuuluvista tietokoneohjelmista (MODER ym. 242–249).

- Ohjelmien kapasiteetti ilmaistaan yleensä tehtävien tai tapahtumien tai molempien lukumäärinä. Eri ohjelmien kapasiteetit saattavat vaihdella muutamasta sadasta lähes 100 000:een tehtävään. Jos läskettävän verkon tehtäväluku ylittää halutun ohjelman kapasiteetin, voidaan verkko jakaa sopivan kokoisiksi osaverkoiksi, mikäli ohjelma pystyy käsittelemään monialkutapahtuma-äloituksen ja monilopputapahtumapäätymisen sekä sovitut äloitus- ja lopetusajankohdat.
- Ohjelman käytön helppous (onko selkeitä opaskirjasia).
- Tehtävien numerointimenetellessä saattaa olla eroja. Jos ohjelma vaatii esim. numeroinnin suoritettavaksi tehtävien suoritusjärjestyksessä, on kyseessä verkon tarkistus- ja uudelleen läskemisen kannalta paha rajoitus. Jos nimittäin verkkoon joudutaan myöhemmin lisäämään tehtäviä, edellyttää niiden numerointi myös lisättyjä tehtäviä seuraavien tehtävien uudelleen numerointia.
- Älku- ja lopputapahtumia sallitaan eräissä ohjelmissa rajattomasti, toisissa on edellytyksenä, että kullakin verkolla on vain yksi älku- ja yksi lopputapahtuma.
- Sovittujen määräpäivien sisällyttämisestä verkkoihin on myös erilaista käytäntöä. Muutamissa ohjelmissa sallitaan sovitto määräpäivä vain päätetapahtumalle, toisissa niitä voi esiintyä myös keskellä verkkoa.
- Kalenteripäivien käytöstä on varmistuttava. Samoin on tarkistettava suunnitteluajanjakson pituus, ts. kuinka monen vuoden kalenterin ohjelma sisältää.
- Tulosten vaivaton läjittelumahdollisuus on yleensä ominaista kaikille ohjelmille. Asiakkaan tulee vain esittää toivomus läjittelupeusteesta. Tällöin tehtävät voidaan läjittellä esim. pelivaran, myöhäisimmän äloitusajan esim. vastualueen tai jonkin muun halutun tunnuksen mukaan.
- Graafisten piirrosten saanti ja mallit on selvitettävä.
- Verkkosten tiivistämistä, tiivistettyjen verk-

kojen yhdentämistä sekä tiivistettyjen ja yhdennettyjen verkkojen palauttamista normaaleiksi saatetaan suorittaa joillakin ohjelmilla.

- Verkkojen tarkistusajomenettelyissä saattaa olla myös vaihtelua eri ohjelmien kesken.
- Lähtöarvojen virheiden paljastamistapaan ja monipuolisuuteen on syytä kiinnittää huomiota.
- Ohjelmista on varmistettava myös ovatko ne tehtävä- vai tapahtumasuuntautuneita, ts. nuoliverkko- vai lohko-verkkoperiaatteelle rakennettuja.

Yleisenä piirteenä verkkosuunnitteluohjelmien kehityksessä voitaneen pitää pyrkimystä erilaisten laskettavan verkon muodolle ja lähtöarvoille asetettujen rajoitusten vähentämiseen ja siten siis joustavampaan palveluun.

Jos yrityksessä harkitaan verkkosuunnittelun laajahkoa käyttöönottoa, on aluksi luontevaa inventoida joustavasti tarjolla olevat tietokonepalvelupisteet sekä niihin sopivat verkkosuunnittelun tietokoneohjelmat. Suunnittelun tavoitteiden perusteella valitaan käyttökelpoisin ohjelma kokeiltavaksi.

Eri tietokoneohjelmien aikalaskelmat eroavat toisistaan yleensä vain käsiteltävien verkko-

jen koon, lukumäärän ja tulostuksen suhteen. Erityisen kriittisesti on arvioitava ohjelmia, joiden ilmoitetaan tekevän kustannus- ja resursianalyysiin liittyviä laskelmia. On myös olemassa joitakin ohjelmia, jotka ajoittavat samanaikaisesti useita projekteja tai suorittavat resursien ja kustannusten tietynlaista optimointia. Vain harvoihin ohjelmiin on näitä erityisominaisuuksia kyetty yhdistämään. (Vrt. PIETÄRINEN 12.)

Tietokonelaskentaa varten tarvitaan tietojen järjestäminen ohjelman vaatimaan muotoon sekä tietojen lävistys. Huomattava osa verkkojen laadinnassa sekä tietojen käsittelyssä syntyneistä virheistä paljastuu ensimmäisen ajokerran virheraportissa. Aluksi kannattaa valita sellainen tulostus, josta saadaan kokonaispelivaran ja tehtävien alkutapahtumien mukaiset tulosten lajittelut. Edellisen perusteella määritellään kriittiset polut ja jälkimmäistä käytetään verkkojen tarkistukseen. Normaalin aika-analyysin tuloksista selviää projektin eri tehtävien aikaisin mahdollinen aloitus- ja lopetusajankohta, myöhäisin mahdollinen aloitus- ja lopetusajankohta sekä vapaa ja kokonaispelivara.

3. VERKKOSUUNNITTELUN METSÄLLISET SOVELLUTUSNÄKYMÄT

31. Metsänviljely- ja taimitarhaprojekti

Metsänviljelyn vuosisuorite kasvoi maassamme 30 000 hehtaarista 132 000 hehtaariin vuosina 1950–1969. MERA III -ohjelman mukaan tulisi vuosisuoritteen edelleen kasvaa 1970 luvulla noin 100 000 hehtaarilla. (Metsätilastollinen . . . 66, 67, 133.)

Koska valtaosa metsänviljelystä on istutusta, edellyttää edellä kuvattu toiminnan laajentaminen myös huomattavaa taimitarhojen kehittämishjelmaa. Sekä taimitarhojen että metsänviljelytoille on ominaista voimakas kausisidonnaisuus. Työt ruuhkautuvat etenkin muutaman viikon kevätaikaan, kun maa on juuri vapautunut lumesta ja roudasta ja on vielä siementen ja taimien kasvuun sopivan kosteaa. Näiden töiden määrällinen lisääntyminen ja maaseudun työvoiman väheneminen ovat viime aikoina lisänneet suunnittelun tarvetta.

Metsänviljely- ja taimitarhojen suunnittelutilanne vaihtelee yrityksen koon, töiden laajuuden ja koostumuksen, työvoiman ja koneiden tarjonnan ym. tekijöiden mukaan. Avosoiden ja peltojen metsitystä lukuunottamatta kytkeytyy metsänviljelyn toteutus puunkorjuun edistymiseen. Täten tarkoituksenmukainen puunkorjuun suunnittelu sekä yleinen metsätaloussuunnitelma muodostavat lähtökohdan tulokselliselle metsänviljelyn suunnittelulle. Taimitarhojen suunnittelu perustetaan puolestaan huomattavalta osin metsänviljelyn ennakoituihin kehitykseen.

Metsänviljely- ja taimitarhojen suunnittelun aikahorisontti vaihtelee suunnittelutilanteen mukaan. Monissa tapauksissa on vuosi- ja kuukausisuunnitelmien laadinta perusteltua.

Metsänviljelyn vuosisuunnitelman laadinta aloitetaan määrittelemällä metsätalous- ja puunkorjuusuunnitelmien mukaisesti työkohteiden

Taulu 4. Nynäsin taimitarhan kevättyöt 1967 (KYMIN OSAKEYHTIÖ).

Tehtävä		Numero	Resurssivaatimus	Kesto pv	Kustannukset mk			
Nimi	Työ- kust.				Kone- kust.	Aine- kust.	Kust. yht.	
Koulituskoneen hankinta	1			48				
Jään hankinta varastoon	2		1 kuorma-auto	3	500			500
Lajitteluhuoneen kunnostus	3		1 sähkömieks, 1 kirvesmieks	6	200		150	350
Siementen hankinta	4		siementä: 150 kg ku, 70 kg mä	12			7 700	7 700
Talvehtimisen tarkastus	5			1				
Lannoitteiden ym. aineiden hank.	6		4 miestä	24			3 000	3 000
Muovihuoneiden pystytys I	7			9	900			900
Muovihuone- ym. tarv. hank.	8			12			3 500	3 500
Kasvuturpeen hank.	9		(2000 m ³)	18			16 000	16 000
Kattolevyjien asennus	10		3 miestä	2	200			200
Routavaurioiden korjaus	11		30 naista	10	4 500		500	5 000
Muovihuoneiden kunnostus	12		1 mies	5	125			125
Kastelulaitteiden kunnostus	13		1 mies	2	50			50
M-nippujen kylmävarastointi	14		4 työntekijää + 1 traktori	7	80	40		120
M-taimien lajittelu ja niputus	15		30 työntekijää	7	5 000			5 000
Muovihuoneitaimien nosto	16		15 työntekijää (2 mlj. tainta)	7	1 600			1 600
Muovihuoneiden purku	17		4 työntekijää	5	500			500
Kasvuturpeen vaihto	18		(2:ssa vuorossa) 1 etukuormaaja + 1 traktori	5		1 600		1 600
Kylvälustojen tasaus	19		4 työntekijää	5	400			400
Taiminippujen jakelu	20		4 työntekijää, 1 traktori	8	220	100		320
Taimien kylmävarast. hoito	21		1 työntekijä	10	200			200
Avomaataiminippujen kylmävarastointi	22		4 työntekijää + 1 traktori	10	140	60		200
Avomaataimien nosto ja lajittelu	23		20 työntekijää + 1 traktori	10	5 000	200		5 200
Avokylvälustojen lannoitus ja muokkaus	24		1 traktori	1		70		70
Muovikylvälustojen lannoitus ja muokk.	25		4 työntekijää	5	400			400
Muovihuoneiden lannoitus ja muokk. II	26		4 miestä	5	500			500
Muovikylvälustan kastelu	27		1 mies	1	25			25
Avokylvälustan kastelu	28		1 mies	1	25			25
Kylvälustan desinfiointi	29		1 mies, 1 traktori	1	20	80		100
Muovihuonekylvö	30		5 työntekijää	5	400			400
Avomaan kylvö	31		10 työntekijää + 1 traktori	5	800	350		1 150
Taiminippujen pakkaus	32		5 työntekijää (5000 pussia)	10	2 000		2 000	4 000
Konekoulinta	33		12 työntekijää, 1 traktori + 1 koulintakone	5	2 400	1 200		3 600
Käsinkoulinta	34		7 työntekijää	8	1 400			1 400

sijainti ja laajuus. Karttojen ja maastohavaintojen perusteella mitoitetaan eri työläjien tarve ja likimääräinen suoritus aika. Vesaikon torjunta, maanpinnan laikutus ja muokkaus, raivaus, taimien työmaavarastojen valmistus, kylvä käsin tai koneella, käsin tai konein tapahtuva istutus, täydennysistutus, materiaalikuljetukset jne. ovat esimerkkejä metsänviljelyn työläjeistä.

Työmenekkilaskelmia varten ryhmitellään työkohteet urakka- ja aikapalkalla suoritettaviin. Työvaikeusluokat arvioidaan. Siementen, taimien ja muiden materiaalien tarpeet määritetään.

Kustannusarvio laaditaan saatujen ihmistyön, konetyön ja eri materiaalien menekkilukujen sekä vastaavien palkka-, urakka- ja hintanormien perusteella. Työntekijöiden majoituksesta ja kuljetuksista sekä mahdollisista muista teki- jöistä aiheutuvat kustannukset on erikseen arvioitava.

Metsänviljelyn vuosisuunnitelmasta saadaan siis arviot erilaisten resurssien ja rahoituksen tarpeista. Kun kokonaistilanne on näin selvitetty, jaetaan työt vastuualueittain (esim. metsä- tekniikkopiiri) sekä jaksotetaan eri kuukausille käyttäen kriteereinä työn luonnetta, ennakoitua resurssitarjontaa sekä yrityksen rahoitustilanteen kehittymistä.

Töiden ruuhkautumisen ja resurssien niukuuden suhteen kriittisimmille kuukausille, esimerkiksi touko- ja kesäkuulle, laaditaan yksityiskohtaiset kuukausisuunnitelmat. *Metsänviljelyprojektin kuukausisuunnittelussa* määritellään eri työläjien ja -kohteiden lopullinen suoritusjärjestys sekä resurssien jako niiden kesken. *Tavoitteena voidaan pitää esimerkiksi, että aikasidonnaiset tehtävät suoritetaan määräpäiviin mennessä siten, ettei ennakoitua eri resurssien tarjontaa ylitetä. Jos työläjeja ja -kohteita on runsaasti, on kyse tyypillisestä verkkosuunnittelun ongelmasta.* Seuraavassa taimitarhatöiden suunnittelun esimerkkitapauksessa käytetty normaali aika-analyysi täydennettynä yksinkertaisella resurssianalyysillä muodostaisi järjestelmällisen metsänviljelytöiden kuukausisuunnittelun lähtökohdan.

Taimitarhatöille laaditaan vuosi- ja kuukausisuunnitelmat edellä kuvailtujen periaatteiden mukaan kulloisenkin suunnittelutilanteen tarkemmin määrittelemällä tavalla. Empiirisenä kuukausisuunnittelun esimerkkinä kuvataan seuraavassa kirjoittajan tekemä Kymin Osakeyhtiön Nynäsin taimitarhatöiden verkkosuunnitelma.

Suunnitelman fyysinen kohde oli kyseinen taimitarha. Suunnitelmaan sisällytettiin normaalit taimitarhanhoitajan vastuualueen tehtävät. Aikahorisonttina käytettiin viittä kuukautta. Aikaväli helmi-kesäkuu kattoi taimitarhan kii- reisimmän työkauden.

Suunnitelmalla pyrittiin helpottamaan taimitarhanhoitajan päätöksentekoa. Päätöksenteon ongelmana oli (1) kyetä suorittamaan aikasidonnaiset tehtävät määräaikoihin mennessä huomioonottaen rajoittavat resurssit sekä (2) pyrkiä eri resurssilajien kuormituksen tasoittamiseen.

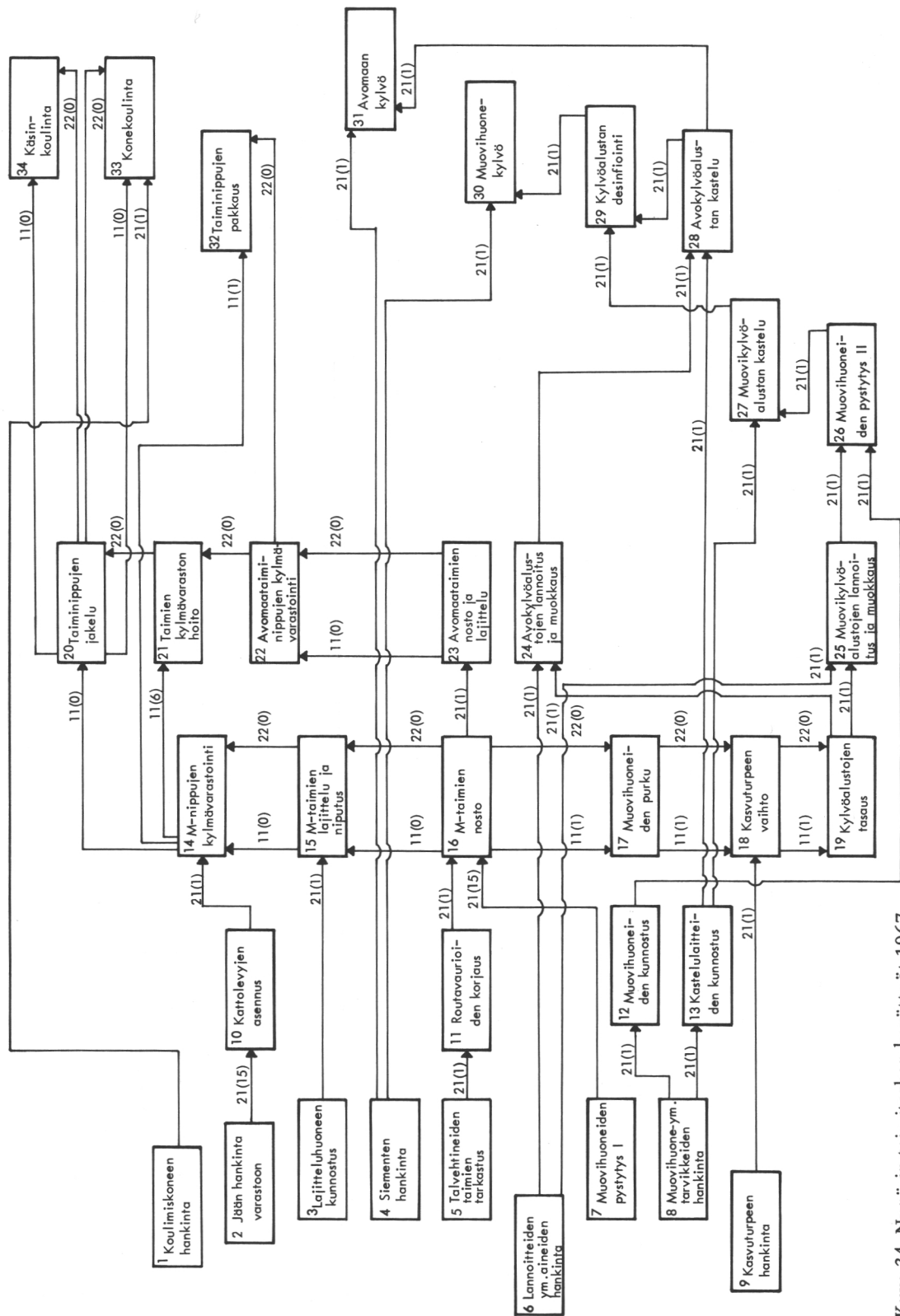
Taimitarhan vuosisuunnitelmassa oli tuotantotavoitteet jo vahvistettu. Toimintaverkon suunnittelussa pidettiin lähtökohdana taimitarhatöiden keskimääräistä ajoitusta aikaisempien vuosien kokemusten mukaisesti sekä asiakkailta saatuja taimitilausten aikataulua.

Kirjoittajan ja taimitarhanhoitajan ryhmätyönä luetteloidiin ensin projektiin sisältyvät tehtävät (taulu 4) ja niiden väliset riippuvuus- suhteet. Kullekin tehtävälle arvioitiin resurssi- tarve, kesto ja kustannukset normalityöaika ja -menetelmiä käyttäen (taulu 4).

Projektiin tuli kuulumaan 34 tehtävää. Kiin- teät määrääjat asetettiin lannoitteiden, koulutus- koneen, jäiden ja kasvuturpeen hankintojen aloittamisille sekä taiminippujen pakkauksen, muovihuonekylvön, kone- ja käsinkoulinnan sekä avomaakylvön lopettamisille.

Toimintaverkko laadittiin lohkoverkko- na (kuva 34). Lähtökohdana pidettiin laskelmien suorittamista valtion tietokonekeskuksen lohko- verkko-ohjelmalla PERT E. Se suorittaa projek- tien normaaleja aikalaskelmia eräin tulostus- vaihtoehtoin. Monitehtävälaitus ja -lopetus (kuten kuvassa 34) on verkon piirtämisessä laskennan kannalta mahdollinen. Taulussa 5 on esitetty suoritettujen aikalaskelman tulokset kokoi- naispelivaran mukaan lajiteltuna.

Yksinkertaisessa resurssianalyysissä voidaan käyttää apuna tietokoneen graafista tulostusta. Siitä voidaan nopeasti tarkistaa samanaikaisesti käynnissä olevien tehtävien resurssikuormitus. Taimitarhaprojektissa oli työntekijät eniten kuormitettu resurssi. Kuormituksen kehitystä analysoitiin kuvassa 35. Tämän kuvan tilanne lähtökohdanaan oli taimitarhanhoitajalla mah- dollisuus toisaalta minimoida resurssirajoitusten ylitykset sekä toisaalta pyrkiä työntekijöiden käytön tasoittamiseen (luvun 25 mukaisesti)

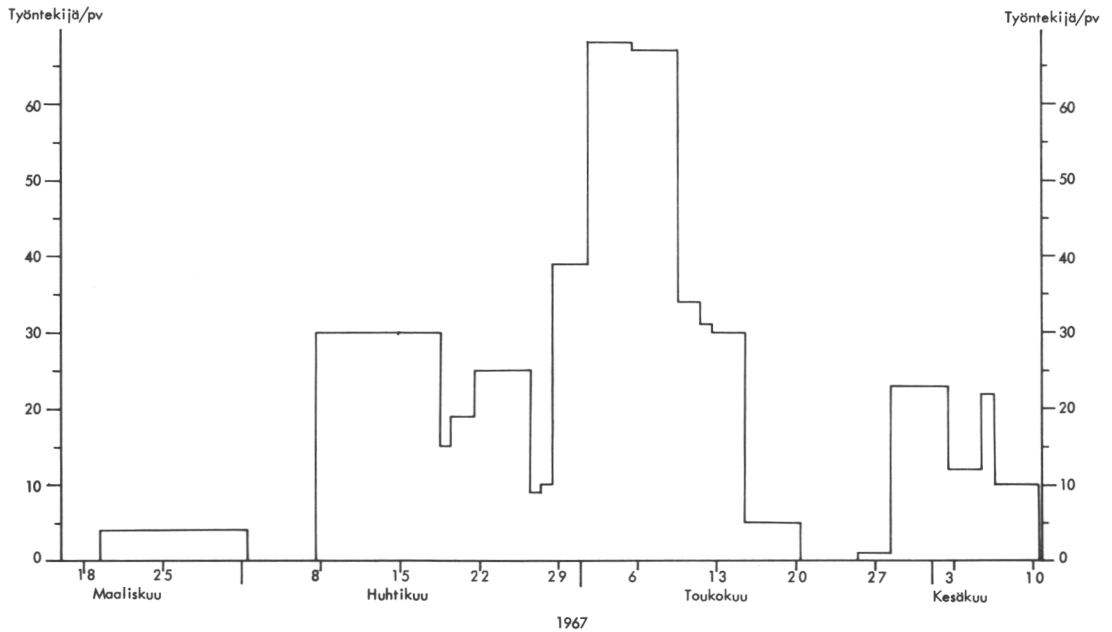


Kuva 34. Nynäsän taimitarhan kevytyöt 1967.

Taulu 5. Nynäsän taimitarhan kevättyöt, PERT E aikalaskelma 2:n tulostus.

Aikalaskelma 2: lajittelu 1.6

Tehtävän nimi	Numero	Osasto	Kesto	Alkaa		Loppuu		Alkaa viimeistään	Loppuu viimeistään	Pehvarat		Pelivara- margin.
				aikaisintaan	Alkaa	aikaisintaan	Loppuu			Vap	Kok	
Koulimiskoneen hankinta	1	1	48 *	TI 28 2 67 *	TO 27 4 67 *	TI 28 2 67 *	TO 27 4 67	TI 28 2 67 *	TO 27 4 67	+23	+0	-23
Jäänhankinta varastoon	2	1	3 *	PE 31 3 67 *	MA 3 4 67 *	PE 31 3 67 *	MA 3 4 67	PE 31 3 67 *	MA 3 4 67	+0	+0	+0
Lannoitteiden ym. aineiden hankinta	6	1	24 *	TI 31 1 67 *	MA 27 2 67 *	TI 31 1 67 *	MA 27 2 67	TI 31 1 67 *	MA 27 2 67	+2	+0	-2
Kasvuturpeen hankinta	9	1	18 *	KE 1 2 67 *	TI 21 2 67 *	KE 1 2 67 *	TI 21 2 67	KE 1 2 67 *	TI 21 2 67	+1	+0	-1
Muovihuonekylvö	30	1	5 *	TI 16 5 67 *	LA 20 5 67 *	TI 16 5 67 *	LA 20 5 67	TI 16 5 67 *	LA 20 5 67	+0	+0	+0
Avomaan kylvö	31	1	5 *	TI 6 6 67 *	LA 10 6 67 *	TI 6 6 67 *	LA 10 6 67	TI 6 6 67 *	LA 10 6 67	+0	+0	+0
Taiminippujen pakkaus	32	1	10 *	TI 2 5 67 *	LA 13 5 67 *	TI 2 5 67 *	LA 13 5 67	TI 2 5 67 *	LA 13 5 67	+0	+0	+0
Konekoulinta	33	1	5***	MA 29 5 67***	TI 6 6 67***	MA 29 5 67***	TI 6 6 67	MA 29 5 67***	TI 6 6 67	+0	+0	+0
Käsinkoulinta	34	1	8 *	MA 29 5 67 *	TI 6 6 67 *	MA 29 5 67 *	TI 6 6 67	MA 29 5 67 *	TI 6 6 67	+0	+0	+0
Kattolevyjen asennus	10	1	2	TO 20 4 67	PE 21 4 67	TO 20 4 67	PE 21 4 67	TO 20 4 67	PE 21 4 67	+0	+6	+6
M-nippujen kylmävarastointi	14	1	7	LA 22 4 67	LA 29 4 67	LA 22 4 67	LA 29 4 67	LA 22 4 67	LA 29 4 67	+0	+6	+6
Taiminippujen jakelu	20	1	8	KE 3 5 67	PE 12 5 67	KE 3 5 67	PE 12 5 67	KE 3 5 67	PE 12 5 67	+0	+20	+20
Taimien kylmävaraston hoito	21	1	10	LA 29 4 67	PE 12 5 67	LA 29 4 67	PE 12 5 67	LA 29 4 67	PE 12 5 67	+0	+46	+46
Muovihuoneiden pystytys I	7	1	9	KE 25 1 67	PE 3 2 67	KE 25 1 67	PE 3 2 67	KE 25 1 67	PE 3 2 67	+0	+46	+46
M-taimien nosto	16	1	7	TI 21 2 67	TI 28 2 67	TI 21 2 67	TI 28 2 67	TI 21 2 67	TI 28 2 67	+0	+46	+46
M-huoneiden purku	17	1	5 *	KE 22 2 67*	*TI 28 2 67*	KE 22 2 67*	*TI 28 2 67*	KE 22 2 67*	*TI 28 2 67*	+0	+46	+46
Kasvuturpeen hoito	18	1	5	TO 23 2 67	TI 28 2 67	TO 23 2 67	TI 28 2 67	TO 23 2 67	TI 28 2 67	+0	+46	+46
Kyöväalustojen tasaus	19	1	5	PE 24 2 67	KE 1 3 67	PE 24 2 67	KE 1 3 67	PE 24 2 67	KE 1 3 67	+0	+46	+46
Muovikyöväalustojen lannoitus	25	1	5	TO 2 3 67	TI 7 3 67	TO 2 3 67	TI 7 3 67	TO 2 3 67	TI 7 3 67	+0	+46	+46
Muovihuoneiden pystytys II	26	1	5	KE 8 3 67	MA 13 3 67	KE 8 3 67	MA 13 3 67	KE 8 3 67	MA 13 3 67	+0	+46	+46
Muovikyöväalustan kastelu	27	1	1	TI 14 3 67	TI 14 3 67	TI 14 3 67	TI 14 3 67	TI 14 3 67	TI 14 3 67	+0	+46	+46
Kyöväalustan desinfiointi	29	1	1	KE 15 3 67	KE 15 3 67	KE 15 3 67	KE 15 3 67	KE 15 3 67	KE 15 3 67	+46	+46	+0
Avomaatimien kylmävarastointi	22	1	10	KE 1 3 67	LA 11 3 67	KE 1 3 67	LA 11 3 67	KE 1 3 67	LA 11 3 67	+48	+49	+1
Avomaatimien nosto ja lajittelu	23	1	10	KE 1 3 67	LA 11 3 67	KE 1 3 67	LA 11 3 67	KE 1 3 67	LA 11 3 67	+0	+49	+49
M-taimien lajittelu ja niputus	15	1	7	TI 21 2 67	TI 28 2 67	TI 21 2 67	TI 28 2 67	TI 21 2 67	TI 28 2 67	+0	+55	+6
Avokyöväalustojen lannoitus	24	1	1	TO 2 3 67	TO 2 3 67	TO 2 3 67	TO 2 3 67	TO 2 3 67	TO 2 3 67	+0	+55	+55
Avokyöväalustan kastelu	28	1	1	PE 3 3 67	PE 3 3 67	PE 3 3 67	PE 3 3 67	PE 3 3 67	PE 3 3 67	+9	+55	+46
Talvehimisen tarkastus	5	1	1	KE 25 1 67	KE 25 1 67	KE 25 1 67	KE 25 1 67	KE 25 1 67	KE 25 1 67	+0	+58	+58
Routavaurioiden korjaus	11	1	10	TO 26 1 67	MA 6 2 67	TO 26 1 67	MA 6 2 67	TO 26 1 67	MA 6 2 67	+12	+58	+46
Muovihuone ym. tarvikkeiden hankinta	8	1	12	KE 25 1 67	TI 7 2 67	KE 25 1 67	TI 7 2 67	KE 25 1 67	TI 7 2 67	+0	+65	+46
Muovihuoneiden kunnostus	12	1	5	KE 8 2 67	MA 13 2 67	KE 8 2 67	MA 13 2 67	KE 8 2 67	MA 13 2 67	+19	+65	+46
Lajitteluhuoneen kunnostus	3	1	6	KE 25 1 67	TI 31 1 67	KE 25 1 67	TI 31 1 67	KE 25 1 67	TI 31 1 67	+17	+72	+55
Kastelulaitteiden kunnostus	13	1	2	KE 8 2 67	TO 9 2 67	KE 8 2 67	TO 9 2 67	KE 8 2 67	TO 9 2 67	+18	+73	+55
Steminten hankinta	4	1	12	KE 25 1 67	TI 7 2 67	KE 25 1 67	TI 7 2 67	KE 25 1 67	TI 7 2 67	+77	+77	+0



Kuva 35. Nynäsän taimitarhaprojektin työpanosanalyysi.

pelivarojen sallimissa rajoissa siten, että eräiden tehtävien suorittamiselle asetetut määräpäivät kyettiin toteuttamaan.

Nynäsän taimitarha valittiin esimerkkiprojektiksi suhteellisen pienen kokonsa vuoksi. Verkkosuunnittelun edut tulevat selvemmiksi kuitenkin vasta suuremmilla taimitarhoilla tai jos taimitarhaprojektiin kytketään myös sen taimia käyttävät metsänviljelyprojektit. Kuvassa 34 käytetty lohkonverkko ei ole myöskään esitystapana niin informatiivinen kuin nuoliverkko. Molempia esitystapoja on vertailtu luvussa 32.

Taimitarhojen kustannuslaskennan kehittämistarve on tuotu esiin eräässä äskettäin ilmestyneessä tutkimuksessa (KUOKKANEN 24). Kustannuslaskennan ja verkkosuunnittelun kehittäminen olisi tarkoituksenmukaista koordinoita. Toimintaverkon tehtävät tulisi tällöin yksilöidä siten, että niistä aiheutuvat välittömät ja välilliset muuttuvat kustannukset olisivat mahdollisimman tarkasti kohdistettavissa taimitarhan eri tuotteille. Toimintaverkon tehtävälueteloa eri kululajien arvioineen (esim. taulu 4) voitaisiin tällöin käyttää kustannustarkkailun eli -seurannan perustana.

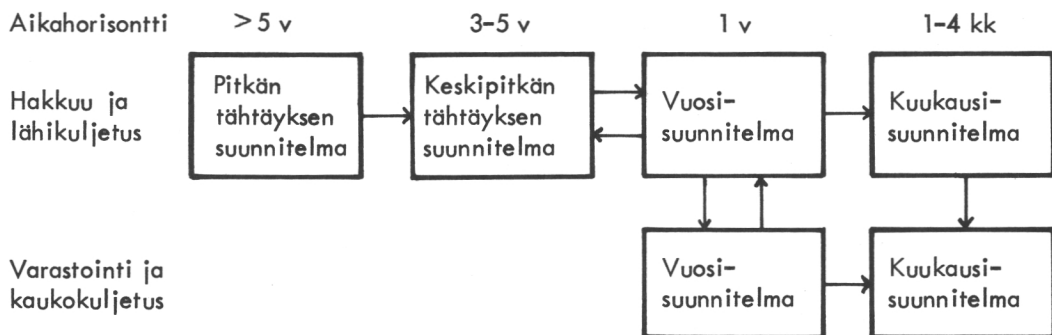
32. Puun korjuuprojektit

321. Verkkosuunnittelun lähtökohta

Etenkin puunkorjuun eri vaiheiden nopea koneistuminen on voimakkaasti lisännyt tämän alan suunnittelutarvetta. Ruotsissa on tämä kehitys kulkenut muutamia vuosia Suomea edellä. Niinpä siellä onkin jo runsaasti erilaisia tämän alan suunnittelumenetelmiä ja -järjestelmiä esitteleviä julkaisuja. Metsäteollisuuden metsäosaston puunkorjuun eri aikahorisontteja ja tehtäväryhmiä koskevien suunnitelmien keskinäisiä vuorovaikutussuhteita on esitelty kuvassa 36.

Hakkuun ja lähikuljetuksen vuosisuunnitelmassa pyritään Ruotsissa (LÖNNER 12, 19) ratkomaan seuraavia ongelmia: (1) Minä vuodenaikoina (talvi, kelirikko, kesä ja syksy) eri leimikot hakataan ja lähikuljetetaan? (2) Mikä on eri resurssien (työvoima, koneet jne.) tarve eri vuodenaikoina? Samojen työläjien kuukausisuunnitelman ongelmanasettelu on edellistä yksityiskohtaisempi: (1) Missä järjestyksessä lähimmän vuodenajan leimikot käsitellään. (2) Kuinka resurssit suunnataan eri leimikoille.

Varastoinnin ja kaukuljetuksen vuosisuun-



Kuva 36. Puunkorjuun eri suunnitelmien vuorovaikutussuhteet (CARLSSON 14).

nittelussa ratkaistavia kysymyksiä ovat: (1) Milloin ja kuinka paljon erilaisia puutavaralajeja on kultakin hankinta-alueelta eri teollisuuslaitoksille kaukokuljetettava? (2) Kuinka paljon erilaisia puutavaralajeja on varastoitava eri varastopaikoilla ja kuinka kauan? Varastoinnin ja kaukokuljetuksen kuukausisuunnittelussa valmistellaan seuraavien päätösten tekoa: (1) Kuinka erilaiset resurssit suunnataan eri kaukokuljetusreiteille ja missä aikataulussa puutavaroimitusten tulee tapahtua? (2) Milloin, kuinka paljon ja miltä varastopaikoilta tulee kunkin käytössä olevan ajoneuvon kuljettaa puutavaraa? (LÖNNER 36, 67.)

Edellä suppeasti erältä osin kosketeltuja ruotsalaisia metsäteollisuusyrityksen puunhankinnan suunnittelujärjestelmiä voidaan kritiikoida siitä, että niiden kehittämisessä on lähdetty liikkeelle liian yksipuolisesti kuvaillusta kuukausi- ja vuosisuunnittelusta. Vasta myöhemmin on ruvettu hahmottamaan metsäosaston budjetoitijärjestelmää ja sen kytkentää koko yritykseen.

Suomessa on äskettäin kehitetty alustava lineaariseen karkeakuormitusmalliin ja matriisimuotoiseen kirjanpitoon perustuva metsäosaston budjetoitijärjestelmän malli (KEIPI). Metsäteollisuusyrityksen metsäosaston budjetti laaditaan pitäen lähtökohtana omien tehtaiden puun tarvetta (nähdään metsäosaston myyntibudjettina). Kuvassa 37 on esitetty tällainen puunhankintajärjestelmän malli.

Yrityksen markkinointi- ja käyttöosastot enakoivat tehtaiden erilaisten puutavaralajien tarpeen. Pysty- ja hankintakauppojen edistymisen arvion, pystymetsävarastotilanteen ja tehtaiden puuntarvetietojen pohjalta laaditaan puun ostosuunnitelma. Erilaiset kuormitusmallit, teh-

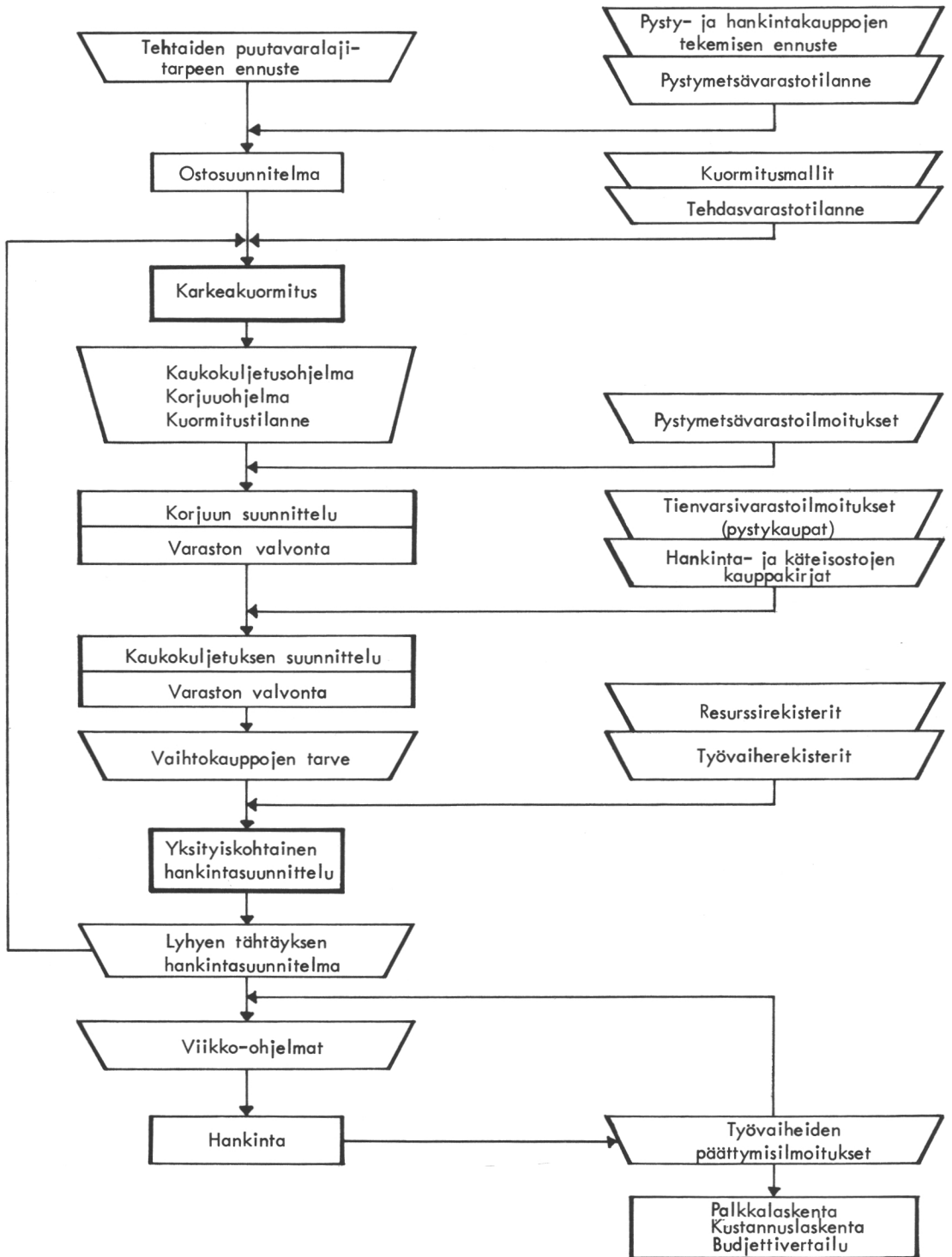
dasvarastotilanne, ostosuunnitelma ja lyhyen tähtäimen hankintasuunnitelma muodostavat karkeakuormitusmallin kehittämisen perustan. Tällöin edellytetään tietoja myös kunkin hankintavaiheen resurssi- ja pääomatarpeista. Karkeakuormituksen suunnitelmahorisontti ulottuu yleensä puolesta vuodesta kahteen vuoteen.

Puun hankinnan yksityiskohtainen suunnittelu (kuva 37) perustetaan varastovalvonnan ilmoituksiin, paljonko kutakin puutavaralajia on eri vuodenaikoina valmistettava, jotta varastot kykenevät tyydyttämään tehtaiden puun tarpeen. Kun toisaalta tiedetään käytettävissä olevat resurssit ja jo käynnissä olevien työmaiden työvaiheet, voidaan puun hankinnan yksityiskohtainen suunnittelu aloittaa. Tämä suunnitelma tulisi laatia huomattavasti karkeakuormituksen suunnitelmahorisonttia lyhyemmälle aikavälille.

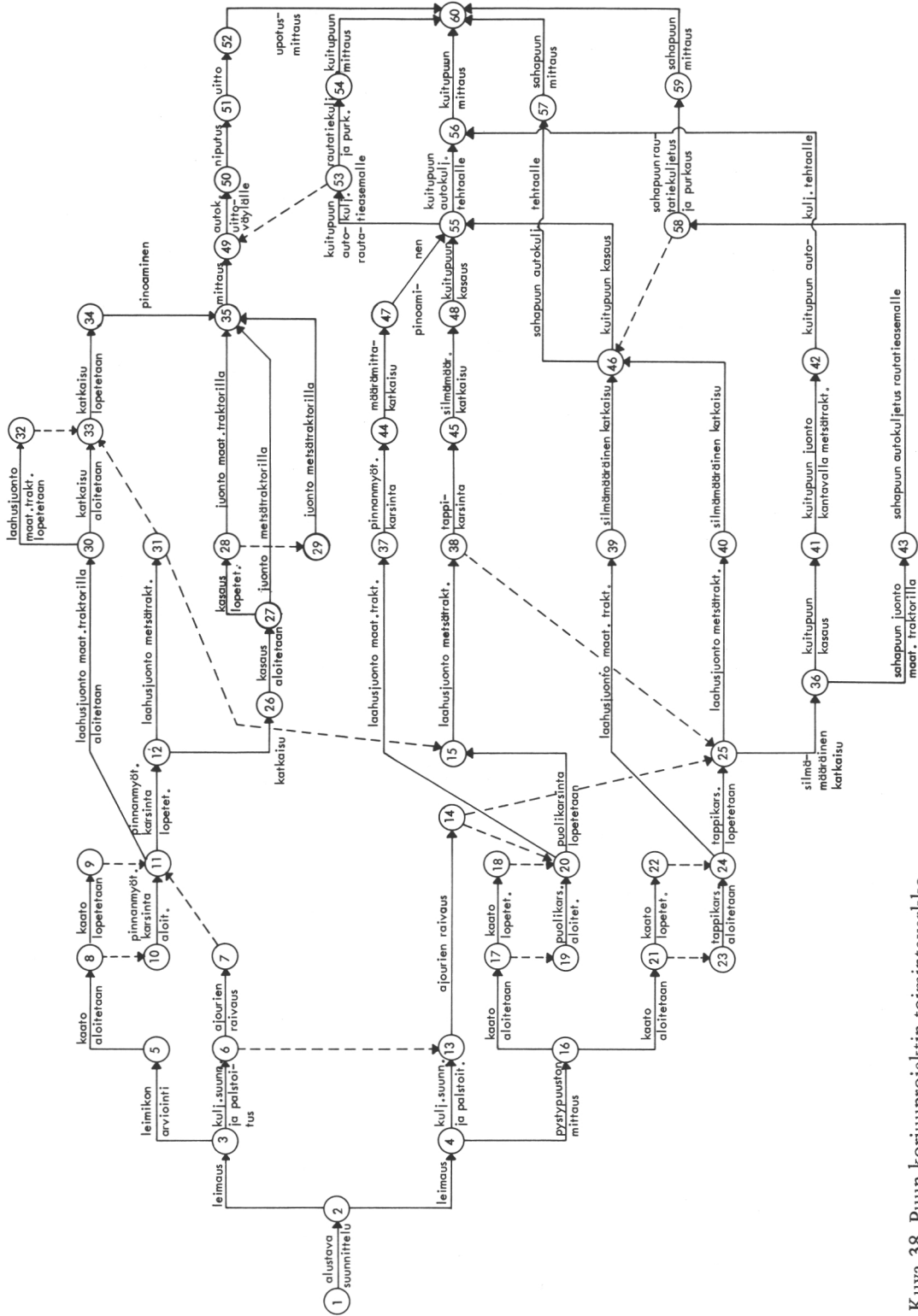
322. Korjuuprojektien verkkosuunnittelu

Verkkosuunnittelun käyttö tulee harkittavaksi eräänä puun hankinnan yksityiskohtaisen suunnittelun välineenä (vrt. KEIPI 3). Kuvassa 38 on hahmoteltu puun korjuuprojektin verkkomalli. Lähtökohtana on kaksi saman vastuualueen työmaata, joiden suunnittelu ja korjuu toteutetaan samanaikaisesti. Kuvan yläosan työmaan puuston leimaus (tehtävä 2–3) ja leimikon arviointi (tehtävä 3–5) suoritetaan perinteiseen tapaan. Sen sijaan alaosan työmaalla toteutetaan pystymittausta (tehtävä 4–16).

Kuvan 38 korjuuprojektissa oletetaan, että eri työvaiheille on etsitty edullisimmat suoritusvaihtoehdot. Ne ovat luettavissa tehtäviä kuvaavien nuolien kohdalta. Nuoliverkko antaa

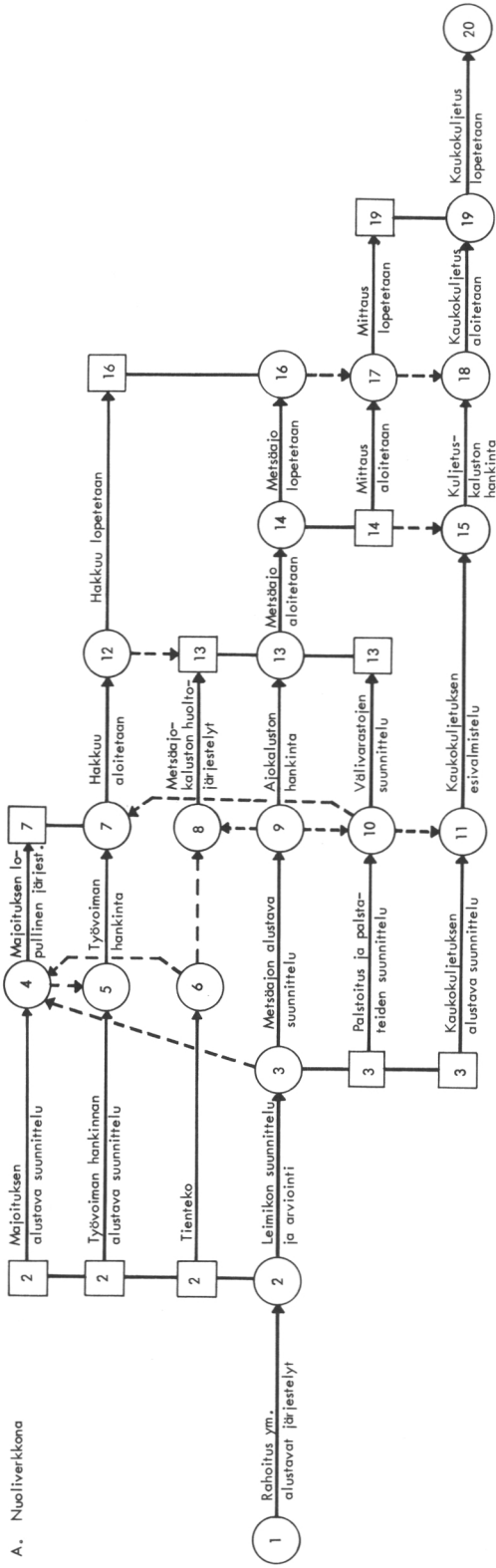


Kuva 37. Puunhankintasysteemin malli (KEIPI 2).

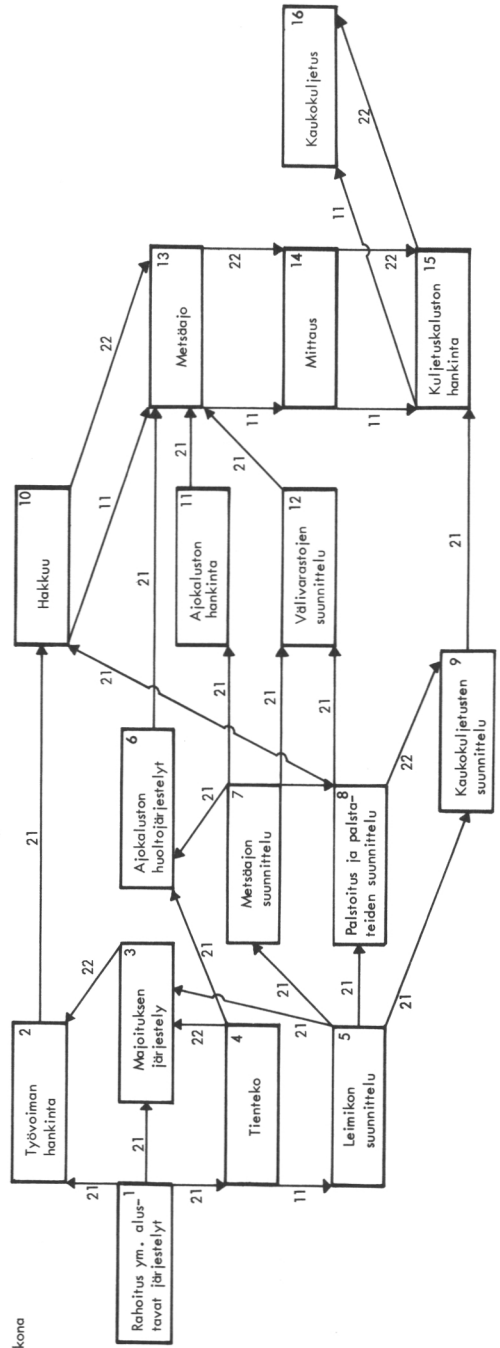


Kuva 38. Puun korjuuprojektin toimintaverkko.

A. Nuoliverkko



B. Lohkoverkko



Kuva 39. Puun korjuuprojektin verkkomalli, yläosassa nuoliverkko, alaosassa lohkoverkko.

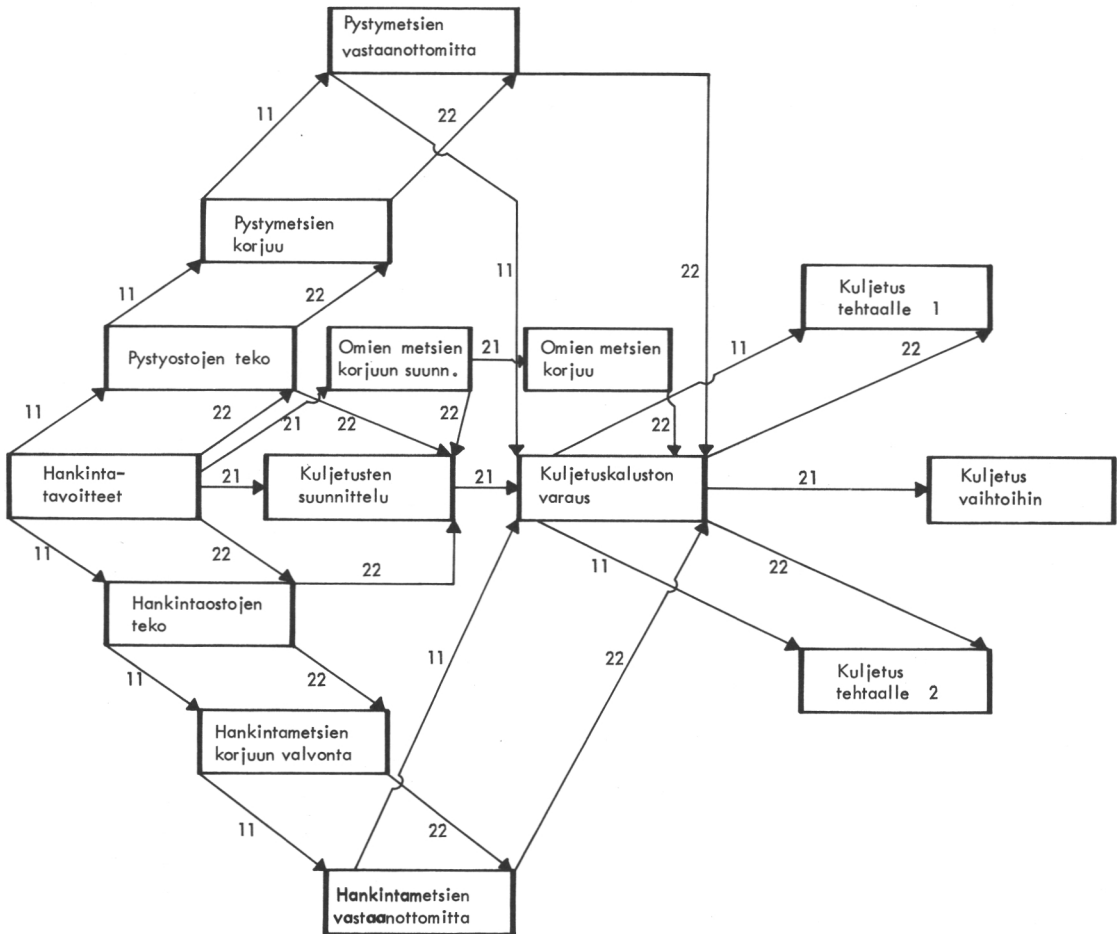
selkeän ja helposti hahmottuvan yleiskuvan koko projektista ja sen tehtävien keskinäisistä riippuvuussuhteista. Tosin puunkorjuun kuvaus lohkonverkkoa käyttäen olisi joustavampaa. Nuoliverkkoa käytettäessä joudutaan monet tehtävät pilkkomaan useampiin osiin (tehtävä aloitetaan jne.). Todellisessa suunnittelutilanteessa kuitenkin esimerkiksi kaato, kuljetukset jne. on vaivatonta jakaa teko- ja ajopalstoittain eri tehtäviksi. Tällöin helpottuu myös resurssien tarpeen, keston ja kustannusten arviointi.

Kuvaan 39 on piirretty sama yksinkertaistettu puun korjuuprojekti sekä nuoliverkkona (yläosa) että lohkonverkkona (alaosa). Nuoliverkon piirtämisessä on käytetty selvyuden lisäämiseksi tapahtumien apuneliöitä. Esimerkiksi tehtävä 1–2 (nuoli) päättyy tapahtumaan 2 (ympyrä). Koska tapahtumasta 2 lähtee kolme nuolta samaan suuntaan (tapahtumiin 4, 5 ja 6),

on tapahtumaa 2 siirretty apuneliöillä portaittain ylöspäin. Tällöin pääosa nuolista voidaan piirtää vaakasuoraan ja tehtävien nimet ovat helppolukuisia.

Kuvan 38 toimintaverkon tai vielä palsta-jaottelulla aikaansaadun sitä yksityiskohtaisemman verkon laadinnan yhteydessä arvioidaan tarvittavat resurssit, kestot ja kustannukset tehtävittäin normaalimenetelmin ja -työajoin suoritettuna. Tavallisin aikalaskelmin selvitetään korjuuprojektin aikataulu ja kriittiset tehtävät luvun 31 taimitarhaprojektin tapaan (taulu 5). Yksinkertainen resurssianalyysi on myös helppo suoritettavissa tietokoneen graafisen tulostuksen pohjalta. Vaativampi resurssianalyysi on mahdollista suorittaa erityisohjelmin.

Puun korjuun toimintaverkkoja voidaan luonnollisesti laatia myös edellistä karkeammille pelkistystasoille, jolloin nämä ns. yhden-



Kuva 40. Puun korjuun yhdenmukainen verkko.

netyt verkot palvelevat yrityksen korkeampia organisaatioportaita. Samoin voidaan verkkojen aikaulottuvuutta laajentaa. Kuvaan 40 on piirretty tällainen yhden vastuualueen (esim. piirisimiespiirin) kattava yhdennetty verkko.

Yrityksen budjetoinnin järjestelystä riippuu, missä määrin on aiheellista käyttää verkkosuunnitelmia aikatauluseurannan lisäksi myös kustannusten tarkkailuun. Tarkoitukseen sopivia valmiita tietokoneohjelmia on olemassa. Niiden syöttötiedoissa voidaan tehtäväkohtaiset kustannukset esittää useina kustannuslajeina ja tehtävät varustaa vastuualuekoodein. Tällöin on kustannustarkkailua varten mahdollista valita haluttu tulostuksen lajittelu.

323. Kehittämisenäkymät

Kuvan 38 verkkomallia voidaan pitää myös alustavana suunnitelmana, jossa yksittäisten tehtävien resurssien käyttö, kustannukset ja kestot on arvioitu ottamatta huomioon projektikokonaisuutta. Kun alustavan verkkosuunnitelman aikalaskelmat ja resurssianalyysi on suoritettu, nähdään päästäänkö tavoiteltuun aikatauluun ja resurssien kuormitusasteeseen. Vaihtelemalla eri tehtävien resurssimääriä tai osittain muuttamalla toimintaverkkoa on mahdollista simuloiden löytää päätöksentekijää tyydyttävä tulos.

Resurssien kuormituksen ohjaus muodostuu hyvin monimutkaiseksi resurssien, tehtävien ja projektien lukumäärän kasvaessa. Projektinvalvonta- ja resurssien kuormitusjärjestelmä ASTRA-DISC on eräs harvoista tämän ongelman ratkaisemiseen soveltuvista tietokoneohjelmista. ASTRA-DISC:n kuormitusohjelma pyrkii ajoittamaan kunkin projektin tehtävät ja kuormittamaan resurssit niin, että projektien kesto-aika minimoituu. Tällöin saadaan ratkaisu nimenomaan sellaiseen ongelmaan, jossa tiettyjen resurssirajoitusten vallitessa pyritään mahdollisimman nopeaan töiden valmistumisen aikatauluun. ASTRA-DISC käsittelee samanaikaisesti 50 eri projektia, joista kussakin saa olla enintään 1100 tehtävää. Resurssien maksimilukumäärä on 100 ja yhden tehtävän osalta 10.

Puun korjuuprojektin kustannusten minimointiongelma voidaan yrittää ratkaista eri menetelmillä. Luvussa 2341 esitelty "heuristinen" menetelmä soveltuu pienehköihin projekteihin. CPM-menetelmän (luku 2432) algoritmien käyttö on mahdollista silloin, kun sen edellyttämät kustannusfunktioiden rajoitukset on täytetty.

Lineaarisen ohjelmoinnin (luku 2442) sovelluksia rajoittaa lähinnä tietokonekapasiteetti. Luvussa 2443 esitelty verkkovirtamenetelmä vaikuttaa myös varsin lupaavalta.

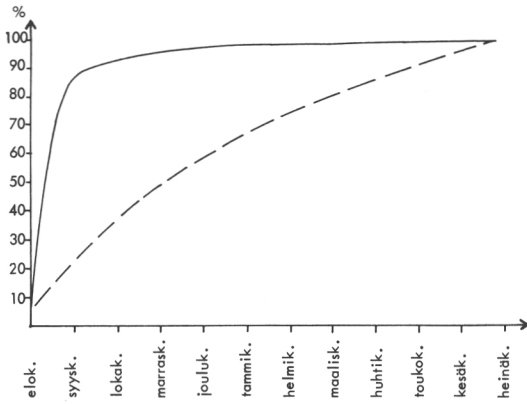
Lineaarisen ohjelmoinnin yhdistäminen toimintaverkon kustannusten minimointiin on suositeltavaa siinäkin mielessä, että menetelmä ottaa samanaikaisesti huomioon myös vallitsevat resurssirajoitukset. Menettelyä on kehitetty Tsekkoslovakiassa (NOVOTNY).

Dynaaminen ohjelmointi on läheistä sukua toimintaverkkomenetelmille. Sitä soveltaen voidaan valita projektin vaihtoehtoisista korjuuketjuista kustannuksiltaan halvin. Esimerkiksi leimikko analysoidaan siten, että metsiköittäin luuteloidaan eri menetelmävaihtoehdot kustannuksineen ja niiden keskinäiset riippuvuudet kuvataan nuolin. Aikaansaatu verkko kasvaa nopeasti metsiköiden ja menetelmien lukumäärän kohotessa. Ottamalla mukaan uusien teiden rakentamismahdollisuus kasvaa kunkin metsikön korjuuvaihtoehtojen määrä. Yleensä suurehkoissa projekteissa on tietokonelaskenta välttämätön. (Vrt. esim. VÄISÄNEN 1967.)

Puun korjuuprojektin verkkosuunnittelun sovellutusmahdollisuuksia on edellä tarkasteltu lähinnä metsäteollisuusyrityksen metsäosaston näkökulmasta. Esitetyt periaatteet ovat useissa tapauksissa sovellettavissa muihinkin metsällisiin yrityksiin ottaen huomioon niiden toiminnalliset erityispiirteet. Perusedellytyksenä luonnollisesti on, että aika on kriittinen tekijä ja että projektit ovat suurehkoja.

Toisaalta nimenomaan metsäteollisuusyrityksillä on paras valmius verkkosuunnittelumenetelmien soveltamiseen eräissä tapauksissa jo melko edistyneitten ATK-systeemiensä ansiosta. Keväällä 1971 suoritetun Metsätehon tiedustelun mukaan oli kahdella metsäteollisuusyrityksellä Suomessa puunkorjuun alalla tietokoneen käyttöön perustuva suunnittelujärjestelmä. Molemmat olivat lineaarista ohjelmointia soveltavia kuljetusmalleja. Yksittäisiä samaa aihetta koskevia kokeiluja on tehty useissakin yhtiöissä. (VÄISÄNEN 1971.)

Metsäteollisuusyritysten puunkorjuun suunnittelun huomattavana vaikeutena on Suomessa suunnittelutyöhön käytettävissä olevan aikavälin lyhyys puiden oston korjuun toteuttamiseen. Kuvassa 41 on esitetty tulokset vastaavan ongelman ratkaisukokeilusta Etelä-Ruotsin metsänomistajajärjestön toimialueella. Varhaisten kauppojen hintalisillä (1.25 kr/m³ sk) saavutet-



Kuva 41. Södra Sveriges Skogsägares Förbundin puunostosopimusten aikajakauma ennen (katkoviiva) ja jälkeen (yhtenäinen viiva) varhaisten kauppasopimusten bonusjärjestelmän käyttöönottoa (EINARSSON 12).

tiin syyskuun alkuun mennessä 90 % koko hakuvuoden ostotavoitteesta, kun vastaava suhdeluku vertailuvuonna oli 19. (EINARSSON 12.)

33. Metsätieprojektit

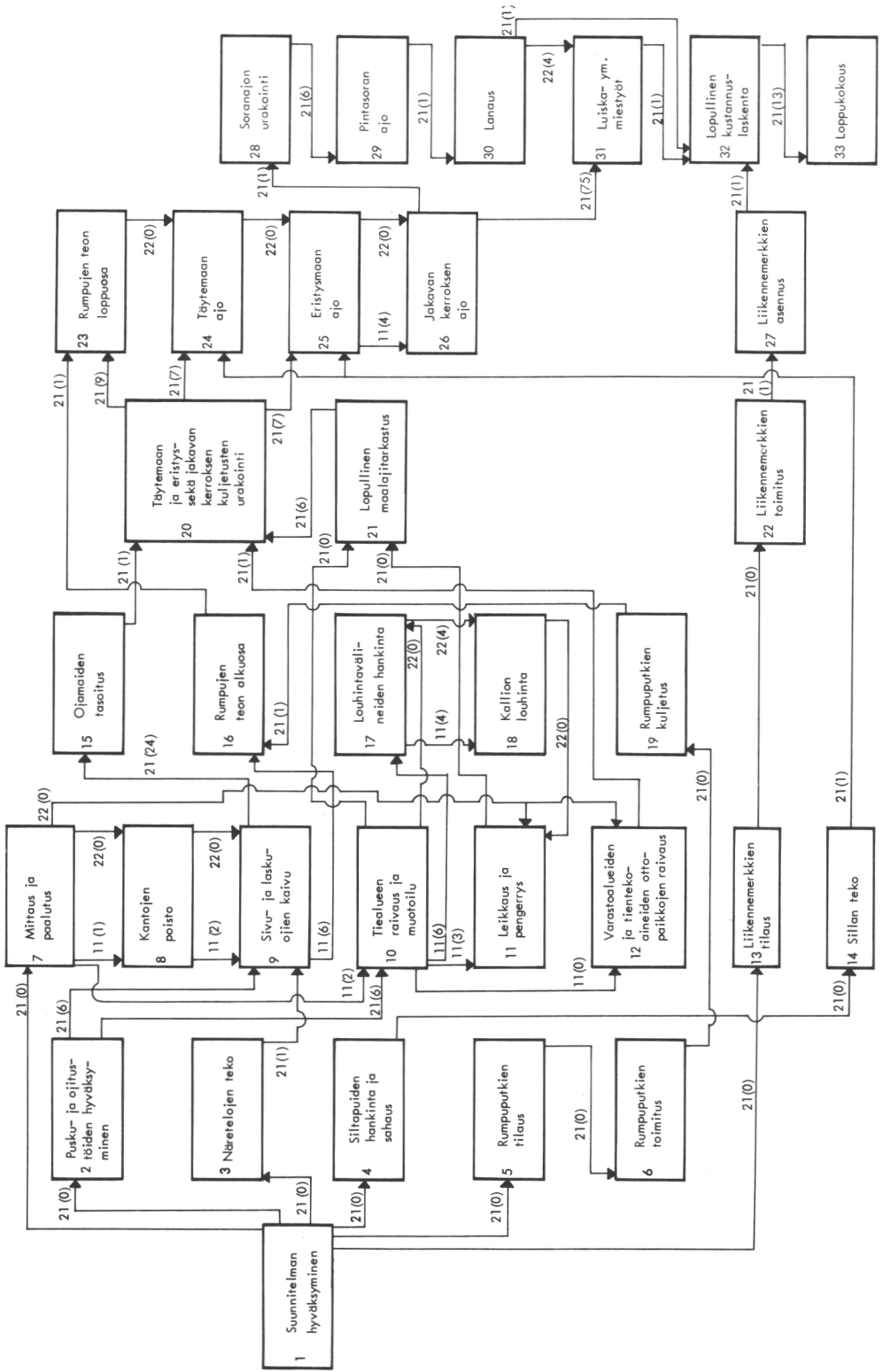
Metsäteiden rakentamista suorittavat Suomessa pääasiassa keskusmetsälautakuntien alaiset metsänparannuspiirit, metsähallinto ja metsäteollisuusyhtiöt. Metsätien teko on tyypillinen projekti. Se koostuu monista toisiinsa kyt-

keytyvistä osatehtävistä, joiden suoritusjärjestys on useimmiten tarkkaan määrätty. Verkko-suunnittelun edullisuus metsäteiden suunnittelussa määräytyy projektin koon ja aikasidonnaisuuden mukaan.

Kirjoittajan ja Kemijärven metsänparannuspiirin metsäteiden suunnittelusta vastaavan metsänhoitajan ryhmätyönä laadittiin kuvan 42 verkko-suunnitelma Kuusingin metsätiehankkeelle Kuusamossa. Tavoitteena oli töiden suoritusjärjestystä kuvaavan mallin sekä hankkeen aikataulun laadinta. Lähtökohdaksi otettiin aikalaskelmien teko valtion tietokonekeskuksen lohkoverkko-ohjelmalla PERT E.

Metsätiehankkeeseen sisältyvät tehtävät tiesuunnitelman hyväksymisestä loppukokouksen järjestämiseen identifioidiin. Samoin määriteltiin tehtävien keskinäiset riippuvuus-suhteet luvun 212 neljän vaihtoehdon mukaisesti. Riippuvuutta 12, seuraavan tehtävän lopetus riippuu edellisen tehtävän aloituksesta, ei esiintynyt. Sen sijaan muut riippuvuudet (11, 21 ja 22) olivat käytössä.

Tietokoneella suoritettiin normaalit aikalaskelmat (vrt. taulu 5, luku 31) ja tulokset annettiin Kemijärven metsänparannuspiiriin käyttöön. Tiehankkeen pituus oli 7.1 km, jonka vuoksi toimintaverkko käsitti vain 33 tehtävää. Verkko-suunnittelun edut korostuivat suuremmissa hankkeissa tai tilanteissa, jossa samanaikaisesti suunnitellaan useampia metsäteitä. Jos tienrakentaminen liittyy osana puunkorjuuprojektiin, olisi tarkoituksenmukaista rakentaa molemmille omat toimintaverkot ja kytkeä ne yhteisillä tapahtumilla toisiinsa.



Kuva 42. Kuusingin metsätieprojektin verkkomalli.

4. TULOSTEN TARKASTELU

Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli: (1) yhdistellä ja kuvata metsällisten projektien suunnitteluun soveltuvaa verkkosuunnittelumenetelmää sekä (2) esittää eräitä kehitetyn menetelmän alustavia metsällisiä sovellutuksia ja arvioida niiden kehittämissuuntia.

Aluksi suoritettiin verkkosuunnittelumenetelmän yhdistely ja kuvaus. Menetelmän metsälliset sovellutukset ja niiden kehittämiskäytöt esiteltiin tutkimuksen loppuosassa.

Projektista laadittu toimintaverkko muodostaa verkkosuunnittelun perustan. Toimintaverkkoa voidaan pitää projektin graafisena systeemimallina. Se on looginen malli, joka kuvaa projektiin kuuluvien eri tehtävien keskinäiset riippuvuussuhteet ja selvittää siten hankkeen toteutuksen kulun sen alkutapahtumasta lopputapahtumaan.

Luvuissa 211 ja 212 esiteltiin toimintaverkon laatiminen nuoli- ja lohkoverkkona. Luvussa 3 kuvailtiin useita metsällisiä projekteja käyttäen molempia esitystapoja. Kuvassa 39 esitettiin sama puun korjuuprojekti sekä nuoli- että lohkoverkkona. Molemmilla esitystavoilla on etunsa ja haittansa. Nuoliverkon riippuvuudet ja projektin kulku on lohkoverkkoa helpommin tajuttavissa. Lohkoverkon laatiminen on ainakin joissakin tapauksissa nuoliverkkoa joustavampaa. Lisäten aputehtävien käyttöä ja soveltaen pitkälle vietyä tehtäväjakoja voidaan nuoliverkkoa suositella yleensä metsällisten projektien kuvaukseen.

Verkkosuunnittelumenetelmiä esittelevässä kirjallisuudessa on kustannuskäsitteet yleensä jätetty määrittelemättä. Luvussa 241 täsmennettiin ensin tarkastelukulma. Projektin suunnittelutilanteessa on tuotettava suoritemäärä eli hankkeen koko etukäteen määritetty. Verkkosuunnittelussa vaikutetaan lopputulokseen vaihtelemalla eri tehtävien suoritusajankohtia sekä jouduttamalla tai hidastamalla niiden kestoa. Tämän vuoksi pidettiin tarkoituksenmukaisena määritellä kustannuskäsitteet ajan funktiona.

Tämän tutkimuksen lähtökohtana pidettiin tilannetta, jossa projektin koko ja laatu oli valmiiksi määritetty. Kriteerien määrittely resurssien ja kustannusten huomioonottamiseksi riippuu kulloisestakin suunnittelutilanteesta. Alkuperäisen PERT-menetelmän kehittämisen lähtökohtana oli valtavien avaruusprojektien to-

teuttaminen mahdollisimman nopeassa aikataulussa ilman resurssi- ja kustannusrajoituksia.

Resurssianalyyseissä pyritään usein projektin lyhimpään mahdolliseen aikatauluun siten, ettei resurssirajoituksia ylitetä. Työvoiman vakinaistamisen ja kalliiden koneiden kapasiteetin käyttöasteen kannalta olisi metsällisten projektien resurssianalyysin tavoitetta edellisestä täsmennettävä. Resurssirajoitusten ylitysten lisäksi myös niiden alitukset tulisi minimoida.

Yrityksen likviditeettirajoitukset, kustannusten minimointi, useiden projektien samanaikainen suunnittelu, eri suunnittelumenetelmien käyttö toisiaan täydentävinä ovat kaikki näkökohtia, jotka saattavat vaikuttaa verkkosuunnittelun tavoitteiden ja niiden toteutumiskriteerien määrittelyyn. Monen projektin suunnittelun epäonnistuminen on aiheutunut juuri tämän vaiheen puutteellisesta täsmäntämisestä. (Vrt. HED ym.)

Verkkosuunnittelun aikalaskennan tilastollisen menetelmän perusteita on jossain määrin kritikoitu. Menetelmää ei ole myöskään juuri ollenkaan sovellettu käytäntöön. Eräs vaikeus on kullekin tehtävälle vaadittavan kolmen keston arvioinnin suuritöisyys. (Vrt. HED ym. 16; DAVIS, JAMES B. 408).

Verkkosuunnittelun käyttö vaatii tekijältään hyvää projektin tuotantoteknologian asiantuntemusta. Yleisintä lieneekin toimintaverkkojen laadinta ryhmätyönä. Verkkosuunnittelumenetelmän käyttöönotto vaatii henkilöstön koulutusta, suunnitteluajan lisäämistä ja tietokone-laskentaa. Näistä ja vastaavista muista tekijöistä muodostuvat verkkosuunnittelun kustannukset. Menetelmän käyttöönottoa harkittaessa on sen mukanaan tuomat lisäkustannukset arvioitava ja verrattava niitä menetelmällä saavutettavissa olevaan hyötyyn.

Toimintaverkkojen laatimissäännöt ovat yksinkertaisia. Myöskään aikalaskelmien teko ilman tietokoneita ei pienissä projekteissa ole kovin suuritöistä. Projektin analysointi verkkomenetelmiä käyttäen vaatii kuitenkin alkeistekniikan lisäksi hyvää projektikentän yleistuntemusta. Suunnittelijoiden koulutus ja suurten projektien työryhmien koordinointi muodostaa siten keskeisen ongelman. Suunnittelupäällikön tulee tarkoin tuntea verkkosuunnittelun eri sovellusmahdollisuudet ja menetelmän rajoitukset. Tämä tekee mahdolliseksi tavoitteiden ja

niiden toteutuskriteerien kullekin suunnittelu-tilanteelle tarkoituksenmukaisen täsmennyksen. Näillä edellytyksillä voidaan verkkosuunnittelua suosittaa harkittavaksi myös metsällisten projektien suunnitteluun.

Mitä monitahoisempi ja aikasidonnaisempi suunnittelun kohteena oleva metsällinen projekti on, sitä suurempi hyöty verkkosuunnittelun soveltamisesta on odotettavissa. Tämän tutkimuksen yhteydessä ei ole tullut esiin näkökohtia, jotka olisivat ristiriidassa tutkimusongelman asettelussa (luku 13) esitettyjen verkkosuunnittelun etuja koskeneiden hypoteesien kanssa.

Yksinkertaisinta verkkosuunnittelua (pelkät aikalaskelmat) voidaan suositella metsänviljely-, taimitarha- ja metsätieprojektien suunnitteluun. Sen sijaan puun korjuuprojekteissa olisi tarkoituksenmukaista edetä myös edistyneempien verkkosuunnittelumenetelmien käyttöön luvussa 323 esitettyjen suuntaviivojen mukaan. Tämä vaatii kuitenkin vielä lisää tutkimus- ja kehittämistyötä sekä verkkosuunnittelumenetelmän sopeuttamista yrityksen budjetointi- ja muuhun suunnittelujärjestelmään.

VIITTEET – REFERENCES

- BATTERSBY, ALBERT 1964. *Network analysis for planning and scheduling*. Mc Millan & Co Ltd. London.
- BITTIG, B. & F. PFISTER 1971. Experience gained with network technique in avalanche control. *Forestry Commission Bulletin* No. 44, s. 92–94. London.
- BJÖRNSTAD, OLA 1966. Glommaanalysen. *Årsmelding nr. 6 fra Institutt for skogøkonomi*. Vollebekk.
- CARLSSON, BENGT 1968. Rutiner för kort-siktig planläggning av drivningsarbete. *Skogsarbeten, Meddelande* nr 5. Stockholm.
- DAVIS, JAMES B. 1968. Why not PERT your next resource management problem? *Journal of Forestry* 66:5, s. 405–408.
- DAVIS, SCHUYLER S. 1967. An adoption of the critical path method of resource allocation. *State of Washington, Department of Natural Resources, Report no. 11*.
- EINARSSON, BÖRJE 1970. Försök med årsplanläggning av drivning inom Jämtlands Skogsägareförening. Testing a one-year-logging-planning routine at the Jämtland Forest Owners' Association. *Forskningsstiftelsen Skogsarbeten, redogörelse* nr 4, 1970. Stockholm.
- EINOLA, JOUKO 1961. Puutavaran hankintakustannusten ennakkolaskenta. *Acta Forestalia Fennica* 73. Helsinki.
- GEARY, R. C. & M. D. Mc CARTHY 1964. *Elements of linear programming with economic applications*. Charles Griffin & Co. Ltd. London.
- HED, SVEN R. & JAN NARSTRÖM 1967. Några krav på program för nätplanering med datamaskin. *Automatisk Databehandling* 1967:3, s. 14–16.
- HUSCH, B. 1970. Network analysis in FAO international assistance forestry projects. *Unasylva* 1970:24(4), s. 18–28.
- JØRGENSEN, FRITS 1964. Kostnader og kostnadsfordeling. *Skogbruksboka*, saetrykk av bind 3, s. 353–376. Skogforlaget A/S.
- KARLSSON, TORD 1966. *Nätverksplanering*. Akademiförlaget. Göteborg.
- KEIPI, KARI 1971. Lineaariseen karkeakuormitusmalliin ja matriisimuotoiseen kirjanpitoon perustuva metsäosaston budjetointisysteemi. *Metsäntutkimuslaitos/ATK-suunnittelu Oy*, moniste.
- KIRMO, PEKKA 1966. Haihduttamot ajallaan, tulistimet tunnilleen. *IBM Katsaus* 1966:2.
- KUOKKANEN, PENTTI 1971. Metsänviljelytaimien kasvatuskustannukset vuosina 1969 ja 1972. Summary: Costs of growing forest-tree seedlings in nurseries in 1969 and 1972. *Folia Forestalia* 122. Metsäntutkimuslaitos. Helsinki.
- KUUSELA, KULLERVO 1965. The principal phases of a forest inventory illustrated by the network analysis. *IUFRO, Section 25 conference paper*. Stockholm.
- LINDGREN J. E. & B. NÄSLUND 1968. *Planering inom skogsbruket med användande av matematisk programmering*. Norstedts. Stockholm.
- LOCKYER, K. G. 1965. *An introduction to*

- critical path analysis*. Sir Isaac Pitman & sons Ltd. London.
- LÖNNER, GÖRAN 1968. Ett system för kort-siktig planläggning av drivning, lagring och vidaretransport av rundvirke. *Skogsarbeten, Meddelande* nr 6. Stockholm.
- von MALMBORG, GÖRAN 1971. Planning theory. Report from working group V:1. *IUFRO, Section 31*. Moniste.
- Metsätilastollinen vuosikirja 1969. Yearbook of forest statistics 1969. *Folia Forestalia* 96. Metsäntutkimuslaitos. Helsinki.
- MODER, J. J. & R. C. PHILLIPS 1964. *Project management with CPM and PERT*. Reinhold Publishing Corporation. New York.
- MODER, J. J. & R. C. PHILLIPS 1968. *Toimintaverkot projektin käsittelyssä*. Suomen Teknillinen Seura. Helsinki.
- NOVOTNY, M. 1971. Application of mathematical methods in operational planning of logging operations. *Forestry Commission Bulletin* No 44, s. 95–103.
- PALO, MATTI 1967. Markkinahakkuiden tilastomenetelmä ja sen suunnittelun kehysmalli. Kansantaloudellisen metsäekonomian lisen-siaattitutkimus. Metsäntutkimuslaitos, metsäekonomian osasto. Moniste. Helsinki.
- PALO, MATTI 1971a. A systems-oriented frame model for planning research projects in forestry. Tiivistelmä: Metsällisen tutkimusprojektin suunnittelun systeemitoeoreettinen kehysmalli. *Metsäntutkimuslaitoksen Julkaisuja* 72.4. Helsinki.
- PALO, MATTI 1971b. Valtion metsäteollisuus- ja metsätalousyritysten koordinointi. Summary: Coordination of state-owned forestry and forest industry firms in Finland. *Folia Forestalia* 126. Metsäntutkimuslaitos. Helsinki.
- PERT . . . a dynamic project planning and control method. *IBM general information manual*. New York.
- PERT C. Valtion tietokonekeskuksen aika-, resurssi- ja kustannuslaskentaohjelma. 1965. Moniste.
- PERT E. Valtion tietokonekeskuksen lohko-verkko-ohjelma. 1966. *Valtion tietokonekeskuksen moniste*.
- PIETARINEN, PENTTI 1970. Toimintaverkkojen soveltaminen käytännössä. Esitelmä *Tietokoneyhdistys ry:n* ATK-päivillä 30. 11.–1. 12. 1970. Moniste.
- Projektinvalvonta- ja resurssien kuormitusjärjestelmä ASTRA-DISC. *Oy Nokia Ab, elektronikka*. Moniste.
- SEPPÄLÄ, RISTO 1971. Simulation of timber-harvesting systems. Seloste: Puun korjuuketjujen simulointi. *Folia Forestalia* 125. Metsäntutkimuslaitos. Helsinki.
- SHAFFER L. R. & J. B. RITTER & W. L. MEYER 1965. *The critical path method*. Mc Graw-Hill Book Company. New York.
- VIRKKUNEN, HENRIK 1951. Teollisuuden kertakustannukset. Niiden degressio sekä käsittely kustannuslaskennassa. *Liiketaloudellisen Tutkimuslaitoksen julkaisuja* 13. Helsinki.
- VÄISÄNEN, UNTO 1966. Operaatioanalyysi puun korjuun optimoinnissa. Moniste.
- VÄISÄNEN, UNTO 1967. Logging and transportation plan of a forest area. *XIV IUFRO-KONGRESS paper*, Section 32. München.
- VÄISÄNEN, UNTO 1971. Korjuutoiminnan suunnittelua esimerkein. *Metsäteho, moniste*.

Planning forestry projects by means of network analysis

SUMMARY

A project is a one-time effort comprising a set of interconnected activities. When executed, these activities lead to a particular desired result. It is characteristic of a project that it cannot be exactly duplicated, in contrast to the continuous processes connected with factory production. This fundamental distinction between a project and continuous production is clearly apparent in the planning phase.

The time, costs and resources required for continuous production are generally known exactly from collected empirical data. The planner of a project tries also to make use of experience gained from comparable, previously executed projects. However, since a given project is always unique, the planner has to amend the empirical data available to a considerable degree according to his own judgement. In the

different phases of the execution of the project, it is to be expected that technical and climatic changes will alter the original cost estimates and scheduling. Therefore, the planner has to be able to check and revise the original plan at any time during the execution of the project. Typical projects are the construction of a building or a bridge and the manufacture of a papermachine.

It is characteristic of a large or a medium-large forestry firm that its activities often involve tens or hundreds of different sites distributed geographically over vast areas. Work at these sites is carried out both simultaneously and sequentially. The operation sites can be categorized on the basis of the difficulty of working conditions, soil fertility, and so forth; for each of these types, different methods and machinery must be applied, even for the same type of work. Nearly all forest work is done out-of-doors; hence, the weather conditions can considerably affect the output. The combined effect of all these factors is that most forestry work resembles more the one-time effort of a project than the continuous effort of factory-production (serial or process production).

Planning and controlling the execution of forestry projects is difficult due to the many factors of uncertainty and risk involved. These require the application of specific methods developed for project management.

The purpose of this study was (1) to describe and develop the network-planning methods applicable to the planning of forestry projects, and (2) to introduce some tentative forestry applications and to estimate future lines of development in this field.

The compilation of a network describing the project forms the basis of network planning. This network can be taken as a graphic systems model of the project. It is a logic model describing the interrelationships between all the project's activities. In other words, the network explains the execution flow from the initial event to the terminal event.

Successful application of network planning

demands expertise in the production technology of the project. Accordingly, the construction of the network is generally a teamwork proposition. The mobilization of network planning in a firm requires training of staff, increasing planning time and having computer service available. These factors make up the main portion of the costs of network planning. In judging the usefulness of the network method, these costs must be estimated and compared with the estimated benefits.

The rules to use in constructing networks are simple. Computing time schedules without using a computer is not too difficult for small projects. Analysing a project using the network method requires, however, expertise in the project field and in the elementary technique. Thus, training the planners and coordinating the various working teams are the central problems. The planning director must have detailed knowledge of the different application possibilities and of the limitations of the network planning methods. This permits a meaningful definition of the goals to be achieved and of the criteria for measuring the level of achievement in each planning situation. With these requisities and reservations, network planning can be recommended for the planning of forestry projects.

The more complicated and tightly scheduled is the forestry project being planned, the greater the benefits to be realized from the application of network planning. Elementary network planning (including network construction, time-schedule computation and simple resource analysis) can be recommended for the planning of projects such as seeding and planting, nursery works and forest-road construction. The application of more advanced network planning methods (including resource allocation algorithms, CPM and linear programming combinations, network flow algorithms, etc.) seems feasible when planning logging projects. This field, however, requires further research and development. Network planning must then also be adapted to other planning activities and to the budgeting of the firm.

- No 83 Ole Oskarsson: Pluspuiden fenotyyppisessä valinnassa sovellettuja valinnan asteita.
Selection degrees used in the phenotypic selection of plus trees. 1,50
- No 84 Kari Keipi ja Otto Kekkonen: Calculations concerning the profitability of forest fertilization.
Laskelmia metsän lannoituksen edullisuudesta. 2,—
- No 85 S.—E. Appelroth — Pertti Harstela: Tutkimuksia metsänviljelytyöstä I. Kourukuokka, kenttälapio, taimivakka, taimilaukku sekä istutus koneet Heger ja LMD-1 istutettaessa kuusta peltoon.
Studies on afforestation work I. The use of semi-circular hoe, the field spade, plant basket, plant bag and the Heger and LMD-1 tree planters in planting spruce in fields. 3,—
- No 86 Pertti Veckman: Metsäalan toimihenkilöiden koulutustarve 1970-luvulla.
Educational requirements of professional forestry staff in the 1970s. 4,—
- No 87 Michael Jones and David Cope: Economics Research in the Finnish Forest Research Institute, 1969—1974. 4,—
- No 88 Seppo Ervasti, Lauri Heikinheimo, Kullervo Kuusela ja Veikko O. Mäkinen: Forestry and forest industry production alternatives in Finland, 1970—2015. 6,—
- No 89 Risto Sarvas: Establishment and registration of seed orchards. 2,—
- No 90 Terho Huttunen: Suomen puunkäyttö, poistuma ja metsätase vuosina 1968—70.
Wood consumption, total drain and forest balance in Finland in 1968—70. 5,—
- No 91 Pertti Harstela ja Teemu Ruoste: Kokonaisten puiden esijuonto kaksirumpuvintturilla käytävä- ja rivihaarvennuksessa. Laitteiden ja menetelmien kehittäelyä sekä tuotoskokeita.
Preliminary full-tree skidding by two-drum winch in strip and row thinning. 2,50
- No 92 Pentti Hakkila ja Pentti Rikonen: Kuusitukit puumassan raaka-aineena.
Spruce saw logs as raw material of pulp. 1,50
- No 93 Kari Löytyniemi: Havupunkin ja kuusen neulaspunkin torjunta.
Control of mites *Oligonychus ununguis* and *Nalepella haarlovi* var. *piceae-abietis*. 2,50
- No 94 Paavo Tiihonen: Puutavaralajitaulukot 5. Koivun uudet paperipuutaulukot.
Sortentafeln 5. Neue Papierholztafeln für Birke. 2,50
- No 95 Jorma Rajala: Nykymetsiköiden kasvuprosentti Suomen eteläpuoliskossa vuosina 1964—68
2,50
- No 96 Metsätalastollinen vuosikirja 1969.
Yearbook of forest statistics 1969. 8,—
- No 97 Juhani Numminen: Short-term forecasting of the total drain from Finland's forests.
Suomen metsien kokonaispoistuman lyhytjaksoinen ennustaminen. 1,50
- No 98 Juhani Nousiainen, Jukka Sorsa ja Paavo Tiihonen: Mänty- ja kuusitukkipuiden kuutio mismenetelmä.
Eine Methode zur Massenermittlung von Kiefern- und Fichtenblochholz. 4,—
- 1971 No 99 Yrjö Vuokila: Harvennusmallit luontaisesti syntyneille männiköille ja kuusikoille.
Gallringsmallar för icke planterade tall- och granbestånd i Finland.
Thinning models for natural pine and spruce stands in Finland. 2,—
- No 100 Esko Leinonen ja Kalevi Pullinen: Tilavuuspaino-otanta kuitupuun mittauksessa.
Green density sampling in pulpwood scaling. 2,—
- No 101 IUFRO, Section 31, Working Group 4: Forecasting in forestry and timber economy.
5,—
- No 102 Sulo Väänänen: Yksityismetsien kantohinnat hakkuuvuonna 1969/70.
Stumpage prices in private forests during cutting season 1969/70. 1,—
- No 103 Matti Ahonen: Tutkimuksia kanto- ja juuripuun korjuusta I. Kokeilu puiden kaatamisesta juurakkoineen.
Studies on the harvesting of stumps and roots in Finland I. Experiment with the felling of trees with their rootstock. 2,—
- No 104 Ole Oskarsson: Plusmetsiköiden valintaero ja jalostusvoiton ennuste.
Selection differential and the estimation of genetic gain in plus stands. 1,50
- No 105 Pertti Harstela: Työjärjestyksen vaikutus tynkäkarsitun ja likipituisen kuusikuitupuun teossa.
The effect of the sequence of work on the preparation of approximately 3-m, rough-limbed spruce pulpwood. 2,50
- No 106 Hannu Vehviläinen: Metsätyömiesten moottorisahakustannukset 1969—1970.
Power-saw costs of forest workers in 1969—1970 3,—
- No 107 Olli Uusvaara: Vaneritehtaan jätteen valmistetun hakkeen ominaisuuksista.
On the properties of chips prepared from plywood plant waste. 2,50
- No 108 Pentti Hakkila: Puutavaran vaurioitumisesta leikkuuterää korjuutyössä käytettäessä.
On the wood damage caused by shear blade in logging work. 2,—
- No 109 Metsänviljelykustannusten toimikunnan mietintö.
Report of the committee on the costs of forest planting and seeding. 9,—
- No 110 Kullervo Kuusela — Alli Salovaara: Kainuun, Pohjois-Pohjanmaan, Koillis-Suomen ja Lapin metsävarat vuosina 1969—70.
Forest resources in the Forestry Board Districts of Kainuu, Pohjois-Pohjanmaa, Koillis-Suomi and Lappi in 1969—70. 5,50

- No 111 Kauko Aho ja Klaus Rantapuu: Metsätraktorien veto- ja nousukyvyistä rinteessä.
On slope-elevation performance for forest tractors. 2,—
- No 112 Erkki Ahti: Maaveden jännityksen mittaamisesta tensiometrillä.
Use of tensiometer in measuring soil water tension. 1,—
- No 113 Olavi Huikari — Eero Paavilainen: Metsänparannustyöt ja luonnon moninaiskäyttö.
Forest improvement works and multiple use of nature. 2,—
- No 114 Jouko Virta: Yksityismetsänomistajien puunmyyntialttius Länsi-Suomessa vuonna 1970.
Timbers-sales propensity of private forest owners in western Finland in 1970. 6,—
- No 115 Veijo Heiskanen ja Pentti Rikkonen: Tukkien todellisen kiintomitan mittaamisessa käytettävät muunto- ja kuutioimisluvut. Sahatukkien mittaus- ja hinnoittelututkimukseen 1970 perustuvat taulukot. 1,—
- No 116 Veijo Heiskanen: Tyvitukkien ja muiden tukkien koesahauksia Pohjois-Suomessa.
Test sawings of butt logs and top logs in Northern Finland. 2,50
- No 117 Paavo Tiihonen: Suomen pohjoispuoliskon mäntytukkipuusto v. 1969—70.
Das Kiefernstarkholz der nördlichen Landeshälfte Finnlands i.J. 1969—70. 2,—
- No 118 Pertti Harstela: Moottorisahan värinä vaikutuksesta työntekijän käsiin.
On the effect of motor saw vibration on the hands of forest worker. 1,50
- No 119 Lorenzo Runeberg: Plastics as a raw-material base for the paper industry in Finland.
Muovit paperiteollisuuden raaka-aineena Suomessa. 2,50
- No 120 Esko Salo — Risto Seppälä: Kiinteistöjen polttoraakapuun käytön väli-inventointi vuosina 1969/70.
Fuelwood consumption on farms and in buildings, intermediate inventory, 1969/70. 3,—
- No 121 Heikki J. Kunnas: Forestry in national accounts.
Metsätalouden kansantulo-osuuden laskenta. 2,—
- No 122 Pentti Kuokkanen: Metsänviljelytaimien kasvatuskustannukset vuosina 1969 ja 1972.
Costs of growing forest-tree seedlings in nurseries in 1969 and 1972. 2,50
- No 123 Juhani Numminen: Puulevyjen käyttö Uudenmaan talousalueella v. 1967 valmistuneissa rakennuksissa.
The use of wood-based panels in buildings completed in 1967 in the Uusimaa Economic Region. 2,50
- No 124 Markku Simula: An econometric model of the sales of printing and writing paper. 3,—
- No 125 Risto Seppälä: Simulation of timber-harvesting systems.
Puun korjuuketjujen simulointi. 4,—
- No 126 Matti Palo: Valtion metsäteollisuus- ja metsätalousyritysten koordinointi.
Coordination of State-owned forestry and forest-industry firms in Finland. 4,—
- No 127 Terho Huttunen: Suomen puunkäyttö, poistuma ja metsätase vuosina 1969—71.
Wood consumption, total drain and forest balance in Finland in 1969—71. 5,—
- No 128 Veijo Heiskanen ja Pentti Rikkonen: Havusahatukkien todellisen kiintomitan määrittäminen latvaläpimitan perusteella.
Determination of the true volume of coniferous saw logs on the basis of top diameter. 5,—
- No 129 Bo Långström: Insektisidien käyttö havupuiden taimien suojaukseen tukkimiehentäin (Hylobius abietis L.) tuhoilta.
The use of insecticides for protection of coniferous planting stock against the large pine weevil (Hylobius abietis L.) 1,—
- No 130 Metsätalostollinen vuosikirja 1970.
Yearbook of forest statistics 1970. 10,—
- No 131 Pertti Harstela: Puunkorjuumenetelmien ergonominen kehitys ja eräät työntekijään kohdistuvat fyysiset vaikutukset.
The ergonomic development of the forest work methods and some physic effects on workers. 2,50
- No 132 Simo Poso ja Matti Kujala: Ryhmitetty ilmakeu- ja maasto-otanta Inarin, Utsjoen ja Enontekiön metsien inventoinnissa.
Groupwise sampling based on photo and field plots in forest inventory of Inari, Utsjoki and Enontekiö. 4,—
- No 133 Matti Palo: Metsällisten projektien verkkosuunnittelu.
Planning forestry projects by means of network analysis. 5,—