

VESITALOUS

2/1986

SISÄLTÖ

- Erkki Vuori, Jarmo Vääriskoski ja Kauko Niinivaara: Lannoitteiden seleenilisä, sen terveysvaikutukset sekä vaikutukset maaperään ja pohjaveteen
- Pertti Vakkilainen: Jätevesien käsittelyasteen valinnasta
- Risto Anttila: Vesilain mukaisista hankkeista aiheutuvien kalastushinkojen arviointi, kompensointi ja korvaaminen
- Ari Myllylä: Mielipiteitä viemäriverkostojen vuotovesiselvitysten luotettavuudesta
- Pertti Heinonen: Maatalous Siikajoen kuormittajana
- Markku Koivisto: Vuotovesien vähentämis- ja yleissuunnitelma
- Pentti Saukko: Ala-Vuoksen vesistömuutokset 1800-luvulla
- Juhani Kettunen ja Kalle Rajantie: Veden laadun havaintojärjestelmien kehittämisestä
- Pentti Rantala: Kehitysmaiden vesihuoltoon liittyviä väitöksiä Tampereen teknillisessä korkeakoulussa
- Vesiasiaa tehdään tutuksi suurelle yleisölle
- Vesitaloudessa vuosina 1981–1985 julkaistut artikkelit



Jätevesien käsittelyasteen valinnasta

Johdanto

Millainen käsittelytapa on suunnittelu-kohteen jätevesille sopivin? Kuinka tehokas tulee käsittelyn olla? Miten vesistön tila muuttuu? Mitkä ovat hyödyt ja kustannukset?

Siinä joukko kysymyksiä, joihin ratkaisun valinnassa joutuu vastaamaan. Järkevä päätöksenteko edellyttää, että hyödyt ovat vähintään uhrausten suuruiset ja että valittu ratkaisu on paras löydettävissä oleva.

Tässä artikkelissa luodaan lyhyt silmäys niihin keinoihin, joita voidaan käyttää apuna ratkaisuvaihtoehdon valinnassa. Perinteisesti ongelman ratkaisu lähtee liikkeelle valintasysteemin toiminnallisten osien, suunnittelun ja päätöksenteon, tehtävästä ja vuorovaikutuksesta.

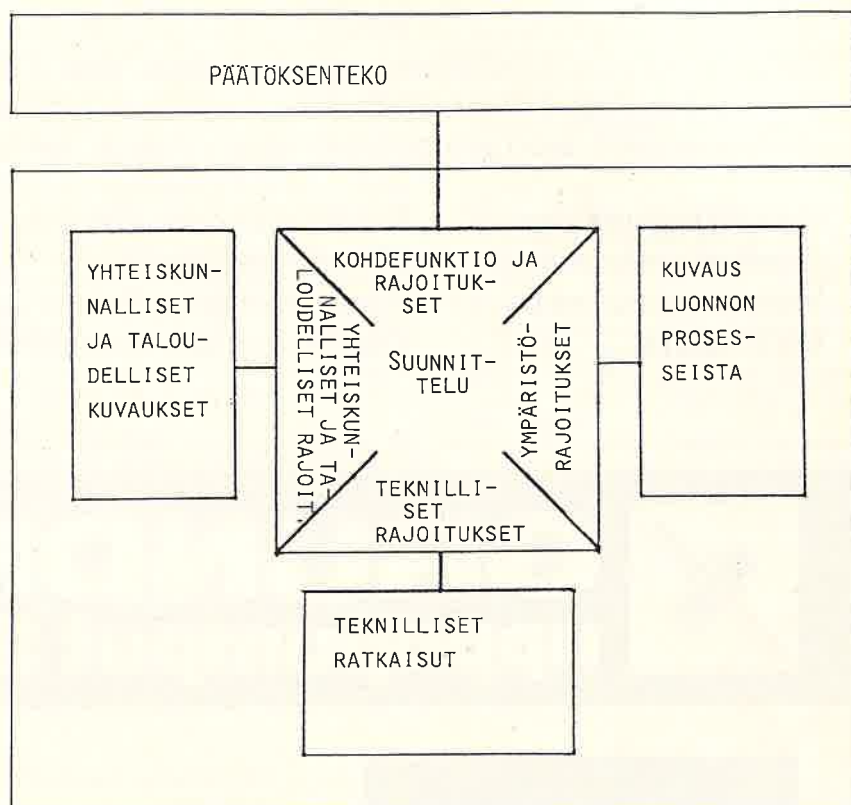
Päätöksenteko ja suunnittelu

Suunnittelu on suureksi osaksi luovaa toimintaa, joka tuottaa yhden tai useamman teknisen ratkaisuvaihtoehdon. Päätöksentekijä asettaa tavoitteet ja valitsee ratkaisun. Suunnittelutilanteet ovat karkeasti jaettavissa kolmeen pääluokkaan: asiantuntijasuunnittelu, matemaattinen optimointi ja monitavoitteinen suunnittelu.

Ns. asiantuntijasuunnittelussa suunnittelija sisäistää ristiriitaiset ja yhteismitattomat tavoitteet valitsemallaan tavalla suunnitteluun ja tuottaa yhden ratkaisun hyväksyttäväksi tai hylättäväksi.

Matemaattinen optimointi edellyttää, että päätöksentekijä antaa etukäteen yksikäsitteisen tavoitteen ja mahdolliset rajoitukset. Perusvaihtoehtojen valinnan jälkeen suunnittelija saa parhaan ratkaisun laskennallista tietä (Kuva 1).

Monitavoitteisessa suunnittelussa ja päätöksentekotilanteessa ei suunnitteli-



Kuva 1. Matemaattinen optimointi vesitaloudellisessa suunnittelussa (Kettunen 1986a).

jalla ole etukäteen yksikäsitteistä kohdefunktiota, jonka minimiä tai maksimia haetaan, vaan hyväksytään tavoitteiden perustavaa laatua oleva yhteismitattomuus. Päätöksenteko muodostuu tällöin selkeästi omaksi toiminnalliseksi osakseen, joka arvioi preferenssit ja valitsee parhaan ratkaisun suunnittelijan tuottamista vaihtoehdoista. Suunnittelijan tehtävä on kuitenkin tuottaa se loogis-matemaattinen kehikko, jolla päätöksentekijä voi mieltymyksensä ilmaista.

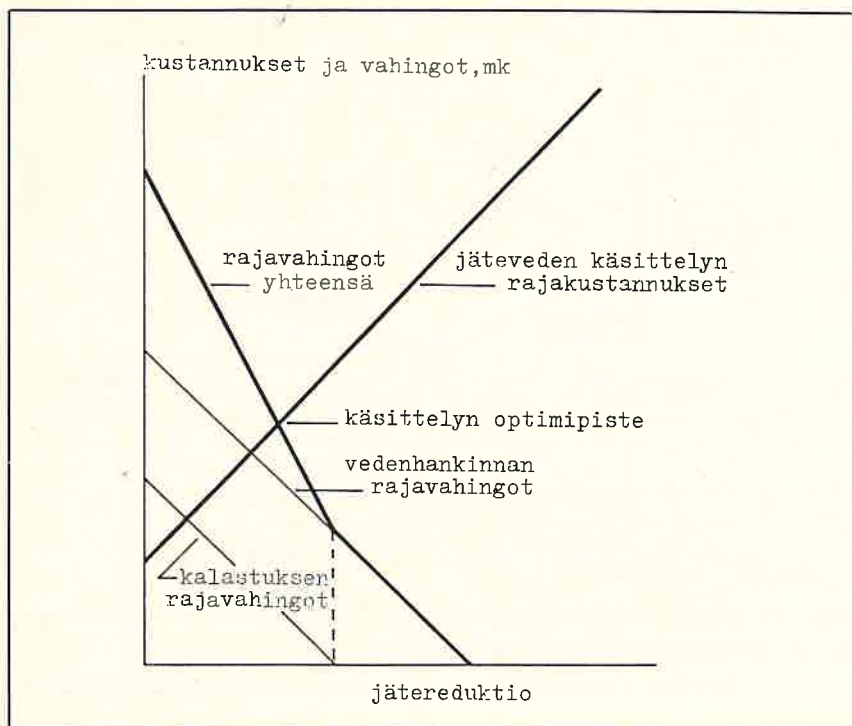
Matemaattinen optimointi

Kun jätevesien käsittelyratkaisussa rajoitutaan rahassa arvostettaviin vaikutuksiin tai päätöksenteko on etukäteen hyväksynyt erityyppisten vaikutusten

yhteisen mittausjärjestelmän, on optimaalisuuden valinta yksinkertainen tehtävä (Kuva 2).

Aina ei ole saatavissa luotettavaa yhteistä mittaa kaikille vaikutuksille. Usein voidaan kuitenkin asettaa asiantuntija-arvioon, hallinnollisiin päätöksiin, budjettirajoituksiin yms. seikkoihin perustuvia raja-arvoja kuormitustekijöille ja kustannuksille. Esimerkkinä optimoinnissa sovellettavasta ajattelusta esitetään TKK:n opintojaksoon "Vesitalouden perusteet" sisältyvä laskentaesimerkki lineaarisesta optimoinnista kalanviljelylaitoksen vesistökuormitukseen sovellettuna. (Kettunen 1986b)

Kalankasvattaja mietti kalarehun valintaa. Päätökseen vaikuttavat vesioikeuden vesistökuormitukselle asetta-



Kuva 2. Periaatekaavio jäteveden käsittelyasteen taloudellisesta optimoinnista (Kneese ja Bower 1968).

mat lupaehtot sekä rehukustannukset. Vesioikeus on asettanut laitoksen enimmäiskuormitukselle arvot 200 kg P/vuosi ja 3 500 kg BHK /vuosi. Markkinoilla on saatavissa kahta erityyppistä rehua. Rehutyypin a hinta on 4.5 mk/kg ja rehutyypin b 4 mk/kg. Kalarehun kulutus molempia rehuja käyttäen on 2 kg rehua tuotettua kalakiloa kohti. Kalakilon tuottajahinta on 12 mk/kg, kun poikaskustannukset on siitä vähennetty.

Laske lupaehtojen mukainen optimaalinen kalantuotanto ja eri rehujen menekki. Rehujen vesistökuormitus on seuraavan taulukon mukainen:

Rehutyppi	Vesistökuormitus kalakiloa kohden	
	P-kuorm.	BHK-kuormitus
Rehu a	10 gP/kg	230 g BHK/kg
Rehu b	17 gP/kg	220 g BHK/kg

Arvioi miten ratkaisu muuttuu, jos kuormitusnormeja tiukennetaan tai löysennetään. Kyseessä on rajoitetun optimoinnin alaan kuuluva tehtävä. On haettava paras taloudellinen tuotto, mutta silti otettava ympäristö huomioon. Vesioikeuden asettamia lupaehtoja kutsutaan optimointitehtävän rajoituksiksi. Alueesta, jolla liikutaan lupaehtojen puitteissa, käytetään nimitystä käypä alue.

Optimoinnin kohdefunktiona on nyt myyntihinnan ja rehukustannusten ero-

tus. Sille voidaan kirjoittaa lauseke:

$$\max J = (12 - 2 \times 4.5)a + (12 - 2 \times 4)b = 3.0a + 4.0b$$

missä:

a on rehun a käytetty määrä

b on rehun b kulutus

Päätösmuuttujia ovat rehun a ja b määrät.

Rajoituksille saadaan:

$$0.01a + 0.017b \leq 200 \text{ kg (P-rajoitus)}$$

$$0.23a + 0.22b \leq 3500 \text{ kg (BHK-rajoitus)}$$

Piirretään käypä alue 2-ulotteiseen koordinaatistoon (kuva 3).

Akselien leikkauspisteet saadaan olettamalla, että käytetään ensin pelkästään rehua a tai pelkästään rehua b. Nämä ovat myös rehunkäytön enimmäisarvot. Tällöin rajoitukset ovat seuraavat:

P-rajoitus:

$$0.01a \leq 200 \text{ kg; } a \leq 20\,000 \text{ kg (rehua a)}$$

$$0.017b \leq 200 \text{ kg; } b \leq 11\,765 \text{ kg (rehua b)}$$

Yhdistetään ko arvot koordinaatistossa (kuva 3).

BHK-rajoitus:

$$0.23a \leq 3500 \text{ kg; } a \leq 15\,215 \text{ kg (rehua a)}$$

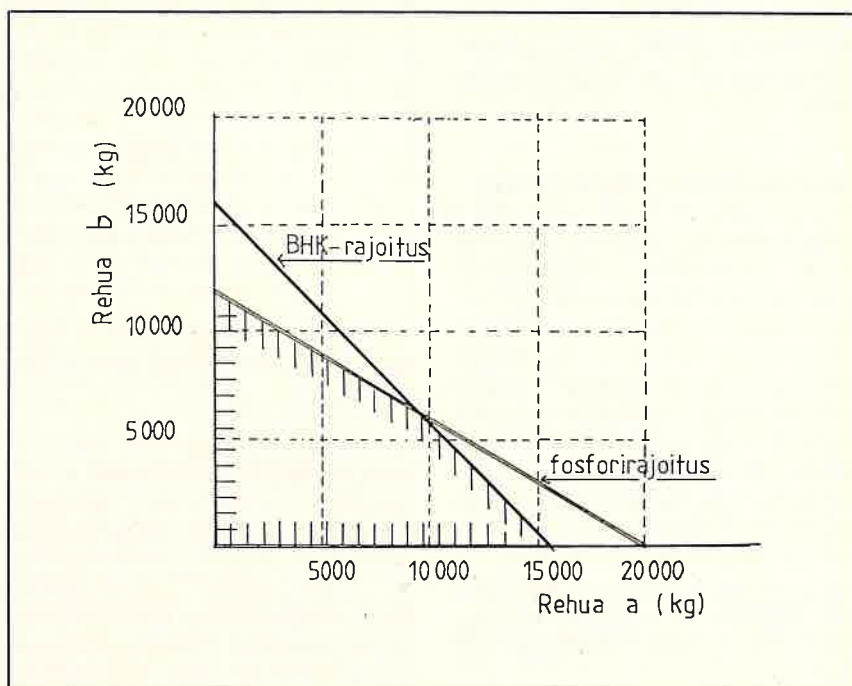
$$0.22b \leq 3500 \text{ kg; } b \leq 15\,900 \text{ kg (rehua b)}$$

Piirretään myös tämä rajoitus koordinaatistoon (kuva 3).

Koska rehunkäyttö on aina joko suurempi tai yhtäsuuri kuin nolla kiloa, toimivat a ja b akselit lisärajoituksina. Käypä alue onkin akseliston ja P- ja BHK-rajoitusten rajoittama alue. Siltä alueelta on nyt etsittävä taloudellisesti edullisin kombinaatio rehujen a ja b käytölle.

Tarkastellaan edellä muotoiltua kohdefunktiota. Huomataan, että se on päätösmuuttujien a ja b lineaarinen funktio. Tehtävänä on etsiä sallitulta alueelta pistepari a,b, joka antaa kohdefunktiolle mahdollisimman suuren arvon.

Kuvaan 4. on uudelleen piirretty sallittu alue. Lisäksi kuvaan on piirretty tasa-arvokäyriä, joilla kohdefunktio saa saman arvon. Esimerkiksi käyttämällä



Kuva 3. Käypä alue lineaarisessa ohjelmoinnissa.

rehua a 10 000 kg saadaan sama tulos kuin rehulla b, kun sitä käytetään 7 500 kg. Tällaisten tasa-arvokäyrien yhtälöt ovat muotoa:

$$b = (4.0/3.0)a + G$$

Tasa-arvokäyrät ovat suoria. Niiden yhtälöt saadaan, kun muutellaan G:n arvoja. Kuhunkin suoraan liittyvät kohdefunktion arvot kasvavat siirryttäessä positiivisessa koordinaatistoneljänneksessä ulospäin (nuolien suunnassa). G:lle valitaan nyt sellainen arvo, että vastaava tasa-arvokäyrä vielä leikkaa käypää aluetta. On helppo havaita, että sellainen piste on P- ja BHK-rajoitusten leikkauspiste. Siinä rehunkulutukselle saadaan arvot:

Rehun a kulutus: 9 100 kg

Rehun b kulutus: 6 400 kg

Tällä optimaalisella rehujen valinnalla voidaan kasvattaa kalaa 7 750 kg. Kalankasvatus tuottaa 26 450 markkaa.

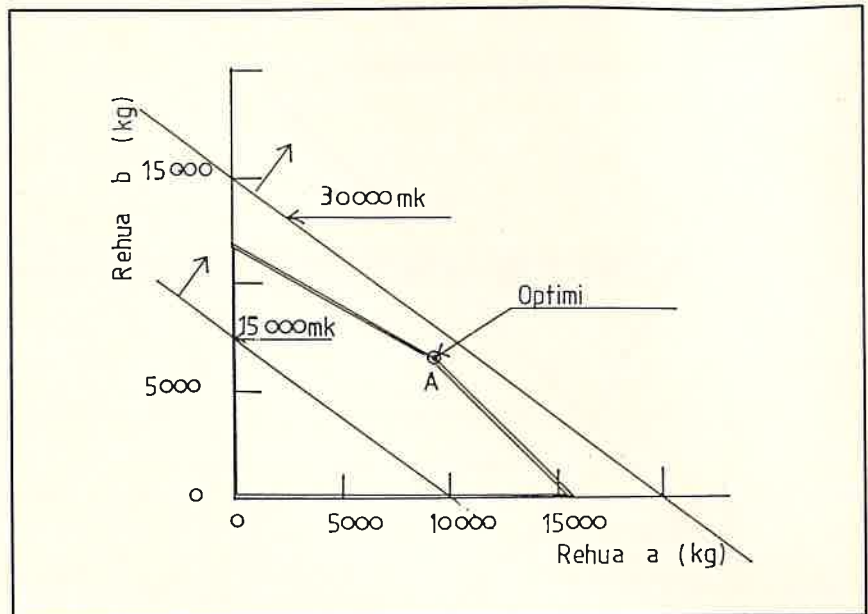
Edellä saatu optimitulo pätee vain esitetyille rajoituksille ja hinnoille. Rajoituksissa ja hinnoissa saattaa kuitenkin tapahtua muutoksia. Näitä tilanteita varten on hyvä tehdä ratkaisun herkkyyssanalyysi. Graafisesti tämä tapahtuu siten, että esimerkiksi kumpaa-kin rajoitusta muutetaan erikseen muiden tietojen pysyessä vakiona. Herkkyyssanalyysi on syytä tehdä myös hinnanmuutoksia varten.

Käsitelty tehtävä voitiin ratkaista graafisesti. Todellisissa käytännön ongelmissa tilanne on kuitenkin toinen. Rajoituksia on tavallisesti kymmeniä. Samoin kohdefunktio riippuu monista tekijöistä. Tällöin graafinen ratkaisu käy mahdottomaksi. Tällaisissa tapauksissa suositellaan edellä mainittuja ohjelmapaketteja. Tällöin myös herkkyyssanalyysi voidaan tehdä perustellummin kuin vain graafisesti tarkastelemalla.

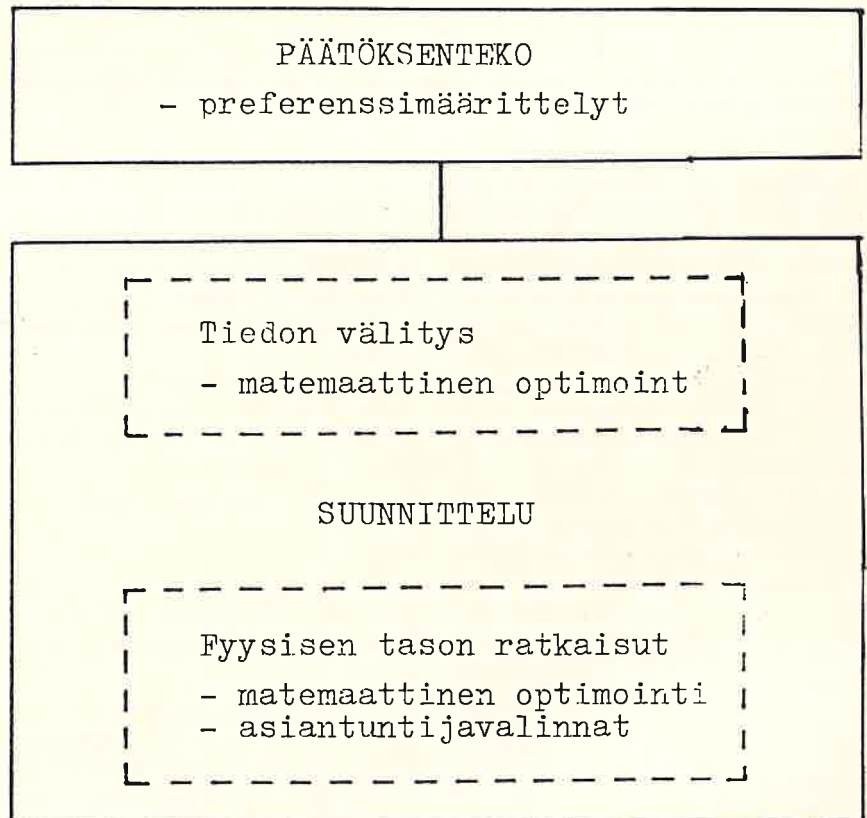
Monitavoitteinen päätöksenteko

Suunnittelulla on usein ristiriitaisia ja yhteismitattomia tavoitteita jotka koskevat kustannuksia, käsittelytehoa, luotettavuutta, ympäristöhaittoja jne.. Suunnittelun ja päätöksenteon kannalta tilanne on onnellinen, jos monitavoitteinen tehtävä voidaan palauttaa tavanomaiseksi optimointitehtäväksi. Tämä voidaan tehdä kahdella tapaa: voidaan käyttää rajoituksia tai painokertoimia. Jos painokerrointen avulla eri tavoitteet voidaan yhdistää, päästään tavanomaiseen optimointiin. Tämä edellyttää luonnollisesti myös sitä, että tavoitteen (tavoitteiden) saavuttamisastetta voidaan yksikäsitteisesti mitata.

Mikäli tavanomaiseen optimointiin ei päästä, on käytettävä jotain monita-



Kuva 4. Optimin haku lineaarisessa ohjelmoinnissa.

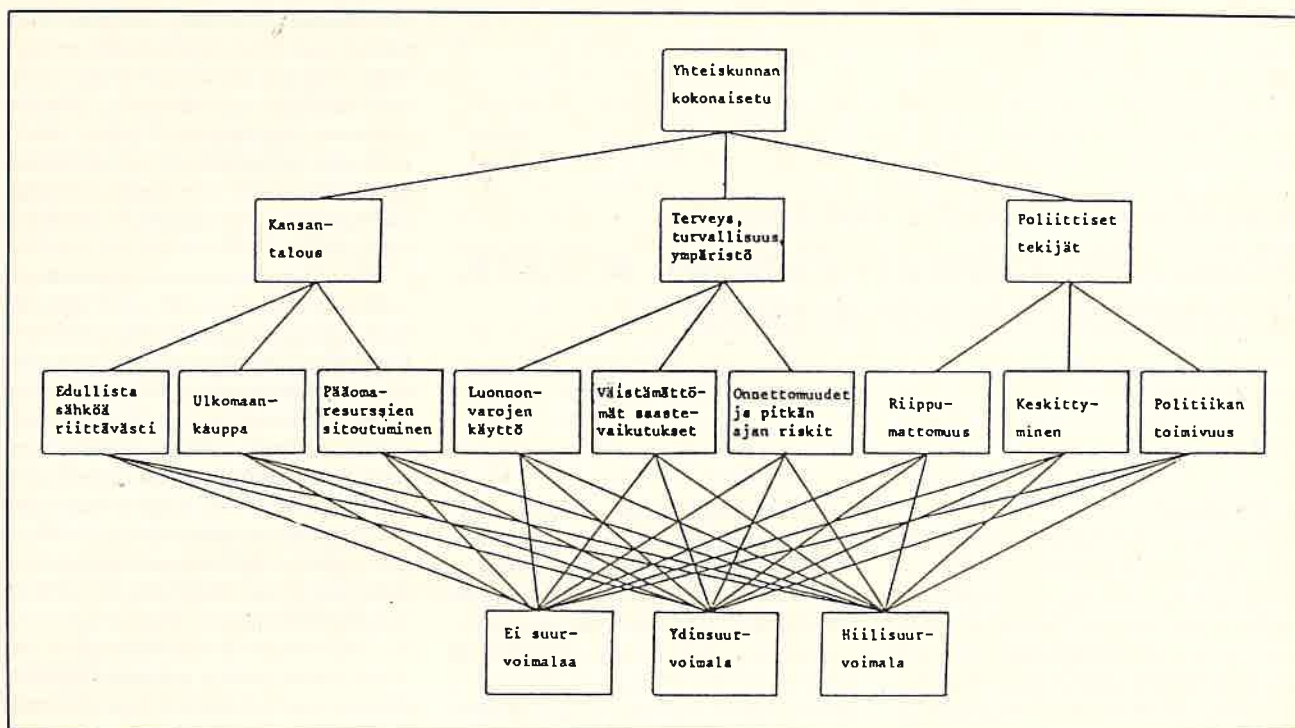


Kuva 5. Suunnittelijan tehtävät monitavoitteisessa suunnittelussa.

voitteisen päätöksenteon tekniikkaa päätöksentekijän mieltymysten ja vaihtoehtojen paremmuuden selvittämiseen. Tavallisesti ratkaisussa lähdetään liikkeelle ns. Pareto-optimalueen haulilla. Tällöin rajataan kondefunktioista pois ne alueet, jotka eivät tule valinnassa kyseeseen. Tämän perusteella voidaan edelleen rajata vastaavat ratkaisuvaihtoehdot tarkastelun ulkopuolelle ja minimoida lopulliseen vertailuun

tulevien vaihtoehtojen määrä. Jäteve-
sien käsittelyyn sovellettuna tämä tarkoittaa, että rajataan lopullisen vertailun ulkopuolelle ensinnäkin ne vaihtoehdot, jotka eivät täytä minimivaatimustasoa annettujen tavoitteiden suhteen, ja toiseksi sellaiset vaihtoehdot, jotka ovat kaikkien kriteerien suhteen jotain muuta vaihtoehtoa huonompia.

Jäljelle jäävät vaihtoehdot ovat matemaattisessa mielessä yhtä kelvollisia



Kuva 6. Energiapäätöshierarkia (Hämäläinen ja Oehlands 1984)

ja tarvitaan todellista päätöksentekoa ratkaisun valinnassa. Esimerkkinä tavanomaisesta päätöksentekomenettelystä voidaan pitää Kymijoen alaosan kokonaissuunnittelussa suoritettua vaihtoehtoverailua (Hirsto ja Vakkilainen 1973, Valtionvarainministeriö 1975).

Kymijoen alaosan kokonaissuunnittelussa esitetty menettely on vain yksi monien mahdollisten joukossa. Siinä havainnollistuu samalla yksi- ja monitavoitteisen suunnittelun oleellinen ero: monitavoitteisessa suunnittelussa suunnittelija ei enää ratkaise tehtävää vaan hän tuottaa tietoa päätöksenteon käyttöön. Suunnittelijan ja päätöksentekijän vuoropuhelun järjestäminen on suunnittelijan tehtäväkenttää. Erilaisiin valintatilanteisiin on kehitetty lukuisia matemaattisia menetelmiä ja arvostelurakenteita. Sopivan menettelyn valinta riippuu lähinnä siitä, kuinka usein päätöksentekijä on käytettävissä ja missä muodossa hän haluaa esittää mielityksensä. Ns. interaktiivinen menettely, jossa päätöksentekijä tarkentaa iteratiivisesti preferenssejään ja suunnittelija ratkaisuvaihtoehtojaan, tuottaa yleensä tyydyttävimmän tuloksen. Usein realistiset mielitykset tulevat ilmi vasta kun saavutettavissa olevat vaihtoehdot ovat pääpiirteissään selvillä.

Monitavoitteista päätöksentekoa koskeva kehitystyö on kohottanut myös matemaattisen optimoinnin mer-

kitystä. Sama metodiikka, mikä soveltuu fyysisen tason ratkaisujen optimointiin, soveltuu myös suunnittelijan ja päätöksentekijän välisen tiedonkulun optimointiin. Suunnittelijan tilannetta on pyritty havainnollistamaan kuvassa 5.

Tiedon kulun vaatima looginen konstruktio kasvaa herkästi hyvin monimutkaiseksi ja kokonaisuus saattaa olla vaikeasti päätöksentekijän hahmotettavissa. Päätöksentekijä kokee tällöin järjestelmän epäluotettavaksi. Arvostelukehikon rakenne on syytä valita suunnittelijan ja päätöksentekijän yhteistyönä ja suunnittelijan omaksi tehtäväalueeksi jää matemaattisten menetelmien soveltaminen ja laskutyö. Suunnittelija vastaa luonnollisesti myös siitä, että järjestelmä sekä rakenteen että laskennan osalta tuottaa tarpeellisen informaation.

Monitavoitteisen päätöksentekomenettelyn kehittämisen tärkeänä lähtökohtana on ollut tarve luoda suunnittelujärjestelmä, missä päätöksenteko ohjaa suunnittelua ja jossa tehtyjen päätösten merkitys on selkeästi nähtävissä. Esimerkkinä käytännön sovellutuksesta, jossa on suoritettu yksityiskohtainen analyysi päätöksentekijän mielityksien mittaamisesta, käy tunnettu energiapolitiittien vaihtoehtojen vertailu (Kuva 6), joka perustuu Saatyn (1980) kehittämään analyttiseen hierarkiaproessiin.

Pitkähköt perinteet monitavoitteisen

päätöksenteon ja suunnittelun kehittämisessä ja soveltamisessa on erityisesti vesitalouden alalla. Suomessa tosin yksittäisiin vesihankkeisiin valtionhallinnossa harvoin sovelletaan täsmällisesti määriteltyä arvostelujärjestelmää. Riittäväksi arvioitu tiedonkulku on turvattu lakimääräisten katselmusten, neuvottelujen, asiantuntijalausuntojen ja monivaiheisen päätöksentekomenettelyn avulla. Prosessin kesto on tyypillisesti useita vuosia. Hallinnollisiin suosituksiin johtavassa vesien käytön kokonaissuunnittelussa on formaalimman päätöksentekomenettelyn käyttö yleisempää.

Tässä yhteydessä on syytä muutamalla sanalla kommentoida juuri esitettyä vesitalouden alalle suunnattua monitavoitteisen suunnittelun menetelmämodifikaatiota (Peltokangas 1986).

Menetelmässä tuodaan vesiensuojeluhyödyn arviointi ns. ekologisuuhyödytekyä, joksi otetaan suoraan jätereaktio. Hyödyn yksikköarvoksi otetaan valitun minimikäsittelyn yksikkökustannus. Vaihtoehtojen edullisuusvertailussa ekologisuuhyöty lasketaan yhteen rahalla arvioitavien ja rahassa arviomattomien hyötyjen kanssa ja summaa verrataan vastaaviin käsittelykustannuksiin.

Nykyisellä vaatimustasolla jätevesien käsittelyyn sovellettuna menetelmä antaa automaattisesti yksikkökustannuksiltaan halvimman ratkaisun edullisimmaksi ja asiallisesti ottaen menettely