

RAKENTEIDEN SUUNNITTELU JA OPTIMOINTI

RISTO SAJANIEMI

Rakenteiden Mekaniikka 1 (1968) ss. 44—52; Kustannus-
osakeyhtiö Rakennustekniikka, Helsinki

Yhteenveto: Artikkelissa todetaan aluksi, että luovan rakenteiden suunnittelun tulee olla nimenomaan optimointia eli parhaimman mahdollisen ratkaisun etsimistä. Seuraavaksi tarkastellaan erilaisia optimoinnin kohteita, niihin vaikuttavia tekijöitä ja käytännössä esiintyviä ongelmia. Ongelmien ratkaisemiseksi esitetään joukko keinoja, joista parhaimmat itse asiassa aloittavat uuden aikakauden rakenteiden optimoinnin historiassa. Lopuksi havainnollistetaan esitystä kahdella esimerkillä, joista toinen on tietokoneella suoritettu nestesäiliön kustannusten optimointi ja toinen lineaarisen ohjelmoinnin mahdollisuuksia valaiseva portaaliikähän ainemenekin optimointi.

1. Yleistä

Ei tarvita suurtakaan taitoa suunnitella rakenne, joka varmasti kestää. Se voidaan ylimitoittaa niin, että sillä ei ole muuta mahdollisuutta kuin pysyä pystyssä. Esimerkkinä tällaisista rakenteista ovat Egyptin pyramidit. Erikoistapauksia lukuunottamatta liiallinen ylimitoitus on kuitenkin tuhlausta. Rakenne on mitoitettava niin, että se täyttää tarkoituksensa vain tarpeellisella varmuudella.

Tiettyyn kohteeseen soveltuvia rakennetyyppejä on yleensä useita. Koska vain yksi niistä toteutetaan, on mahdollisuuksien suurta lukumäärää pienennettävä. Parhaiten se voidaan suorittaa käyttämällä menetelyä, jota kutsutaan optimoinniksi. Optimoinnilla tarkoitetaan tietyissä suhteissa parhaimman mahdollisen ratkaisun etsimistä probleemaa.

Luovan rakennesuunnittelun tulee siten olla nimenomaan optimointia. Aina näihin päiviin asti luovan työn osuus rakenteiden suunnittelussa on ollut pieni. Parhaimmillaankin on tyydytty mahdollisimman yksinkertaiseen optimointiin, muutamien erillisten vaihtoehtojen laskemiseen. »Suunnittelu» onkin ollut pääasiassa »rutiininomaisista» konstruktioalaskelmien suorittamista, jossa lopputulokseen vaikuttamisen mahdollisuudet ovat olleet pienet. Tätä tukee kirjoituksessa (1) oleva virke: »Rakennusalalla suunnittelija on usein se välttämätön paha,

jota tarvitaan rakennuttajan ideoitten puhtaaksi piirtämiseen ja rakennusluvan hankkimiseen.»

Syyt vähäiseen optimointiin ovat moninaiset. Ensiksikin monien vaihtoehtojen laskeminen on työlästä, joskus kiireen tai työnpaljouden vuoksi mahdotontakin. Toiseksi optimoinnin avulla alentuneista kokonaiskustannuksista on hyötynyt vain rakennuttaja ja kiinteisiin taksoihin sidottu insinööripalkkio on pienentynyt. Esteinä ovat siis olleet insinöörien hyvät työmarkkinat ja harjoitettu taksapolitiikka. Optimoinnin suuri-työisyys on osittain johtunut alalla suorite- tuista vähäisistä tutkimuksista. Varsinaisia julkaisuja ei ole ilmestynyt juuri lainkaan, ainoastaan joitakin artikkeleita. Nekin käsittelevät yleensä erikoistapauksia (2, 3, 4), teräsrakenteita (5, 6, 7), joita Suomessa käytetään suhteellisen vähän, tai teräsbetonisia yksityisiä rakennegoisia (8, 9, 10).

2. Optimoitavat suureet ja niihin vaikuttavat tekijät

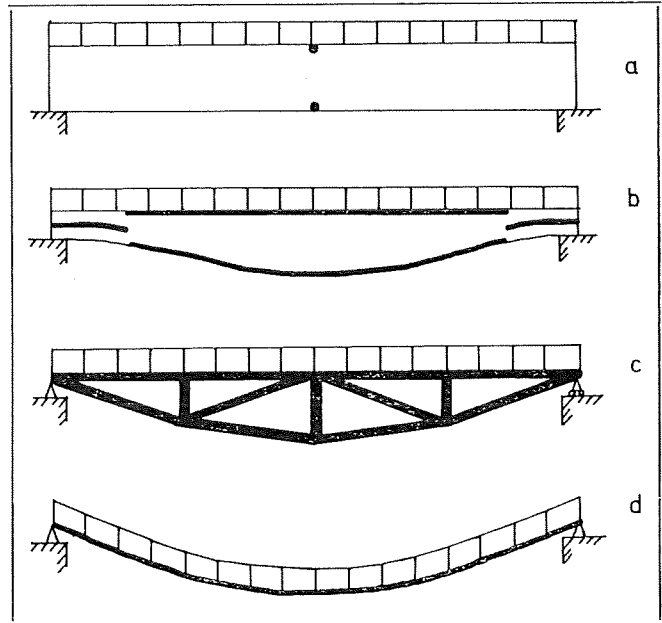
Optimoinnin tulos olisi oltava joka suhteessa paras ratkaisu. Sen tulisi täyttää asetetut vaatimukset ja olla lisäksi taloudellinen. Voidaan optimoida muutakin kuin kokonaiskustannuksia, jotka tavallisesti käsitetään ainoaksi mahdolliseksi optimoinnin kohteeksi. Kohteena voi olla esim. vain ainemenekki tai työ- kustannukset, mutta myös rakentamisaika, rakenteen toimintakelpoisuus, sen varmuus kuten pyramideissa on tehty, työvoima ja työvälaineet, esteettisyys jne. Viime mainitusta on hyvänä esimerkkinä Taj Mahalin temppeli Intiassa, jossa kustannusten optimoinnilla ei ole ollut mitään merkitystä esteettisyyden optimoinnin rinnalla. Yksinkertaisuuden vuoksi optimoidaan tavallisesti vain yhtä suurta kerrallaan, mutta on luonnollista, että optimoinnin kohde voi koostua useammankin suureen yhdistelmästä.

Yleisin optimoinnin kohde on ainekustannukset, johon vaikuttavat sekä materiaalin hinta että sen menekki. Luonnosta saatavat raaka-aineet ovat yleensä edullisia, varsinkin jos kuljetusyhteydet ovat heikot. Aina halvin materiaali ei kuitenkaan ole edullisin. Teräsrakenteiden ainemenekkiä optimoitaessa otetaan joskus huomioon myös rakennesien yhteenliittämiskustannukset (7).

Rakenteen osien yhteenliittämiskustannukset kuuluvat työkustannuksiin, joihin vaikuttavat myös työntekijöiden määrä ja ammattitaito sekä käytettävissä olevat työkonet. Sellaisten työmenetelmien ja rakenteiden, joita on totuttu käyttämään kaupungeissa, soveltaminen etäällä asutuskeskuksista voi olla epäedullista, jos ammattityöväkeä ei ole saatavissa. Jos rakentamisaikaa on lyhennettävä kustannusten noususta huolimatta, tämä saattaa vaatia esimerkiksi elementtien käyttöä.

Suunnittelijan on tunnettava rakenne muutenkin kuin paperilla. Rakennuksen käytön huomioon ottamisesta optimoinnissa on eräänä esimerkkinä sairaalan kattilahuone, joka louhittiin noin kaksi metriä syvemmälle kalliin, jolloin saatiin vaakasuoraksi käytävä, jota pitkin kuljetettiin paa-reja. Tällöin jouduttiin arvioimaan käyttökustannukset tulevaisuudessa ja vertaamaan niitä rakennuskustannusten nousuun. Samantapainen yleisempi tilanne on kunnossapito- ja rakennuskustannusten vertailu. Samoin joudutaan joskus toiminnallisista tai esteettisistä syistä suurentamaan esimerkiksi pilarivälejä.

Rakenne on lisäksi suunniteltava siten, että valittua rakennemateriaalia käytetään parhaalla mahdollisella tavalla. Tämän optimoinnin luonne on kaksitahoinen. Toisaalla on puhtaaseen ajatteluun ja oivallukseen perustuva optimointi, jota käsiteltäessä viitataan nimekkäiden arkkitehtien ja luonnon antamiin esimerkkeihin (11, 12), toisaalla taas yleensä suuren laskentatyön vaativa teknismatemaattinen optimointi (13). Rakennemateriaalin optimoinnista on esimerk-



Kuva 1. Rakennetyypin optimointia.
Effects of optimizing shape.

kinä kuvan 1 tasaisesti kuormitettu kaksitukkinen palkki (11), joka on a-tapauksessa täysin rasiitettu vain keskikohdan ylä- ja alapinnasta; muualla on materiaalin tuhlausta. Seuraavassa kohdassa on ylä- ja alapinta jo pidemmällä matkalla täysin rasiitettu. Tukien lähellä aiheuttaa leikkausvoima palkin keskelle määrävän rasiituksen. C-kohdassa tehtyjen reikien avulla saadaan koko rakenne täysin hyväksi käytetyksi. Viimeisenä d-kohdassa on köysi. Se on yksinkertaisin rakenne, joka täyttää primäärisen tehtävän, kuorman kantamisen. Kuitenkaan täysin rasiitettu rakenne ei aina ole edullisin (14), esimerkiksi rakenteen pieni jäykkyys ja suuret taipumat aiheuttavat sen, että d-kohta ei välttämättä ole oikea ratkaisu. Suunnittelijan vaativa tehtävä onkin arvostella eri rakennetyypit ja valita niistä sopivin.

3. Ongelmat

Jo edellä on tullut esille joitakin ongelmia, joita käytännön optimointityössä voi esiintyä. Seuraavassa on tarkoitus tarkastella laajemmin optimointiin liittyviä pulmia.

Optimoinnin kohteella (minimoitavalla funktiolla) on useimmiten monta muuttujaa, joita voidaan varioida. Eräät, kuten mitat ja lujuusarvot, ovat selviä suureita ja helposti muunneltavissa. Toiset, kuten rakenteen tyyppi ja muoto, ovat abstraktisempia ja siten vaikeammin varioitavissa. Muuttujien suuri määrä aiheuttaa jopa mahdottomuusiin nousevan työn, sillä jos viisi muuttujaa saa kukin kymmenen eri arvoa joudutaan laskentatyö suorittamaan $10^5 = 100\,000$ kertaa. Eräs pääongelma onkin tärkeiden muuttujien valitseminen ja niiden lukumäärän rajoittaminen kohtuulliseksi.

Mikä näistä muuttujista on sitten tärkein? Yksikäsitteistä vastausta ei tietenkään voida antaa; tärkeysjärjestys riippuu sellaisistakin seikoista kuin luonnon tarjoamat raaka-aineet, maantieteelliset seikat, kulttuuri, käytettävissä oleva tekniikka, kansantaloudelliset ja poliittiset olosuhteet jne. Koska käytännössä on mahdotonta optimoida kaikkea, on tervettä järkeä käyttäen valittava eri muuttujista tärkein tai tärkeimmät.

Minimoitava funktio on selvimmässä tapauksessa matemaattinen kaava. Rakenteiden suunnittelussa on laita näin onnellisesti vain harvoin. Funktio, kuten rakennuksen kokonaiskustannukset, ei ole kirjoitettavissa edes implisiittisessä muodossa. Lisäksi rajoitettavia ehtoja on paljon: talouspoliittiset, tekniset rajoitukset jne., joiden pukeminen matemaattiseen muotoon on hankalaa.

Funktiolla on yleensä paljon minimikohdista, joista vain yksi on ratkaisuksi kelpaava. Muut ovat esimerkiksi poikkileikkausprofiilista toiseen siirryttäessä syntyviä »sahalaitaminimejä».

Tyypillinen tällainen funktio on havaitaan edempänä olevassa nestesäiliöesimerkissä sekä artikkelissa (15). Funktio saattaa olla hyvin loiva, jolloin jokin väärin arvattu sinänsä vähämerkityksinen parametri voi muuttaa minimin aivan toiseen paikkaan. Loivasta kustannusfunktioista on tietysti se etu, että erehtyminen ei aiheuta suuria lisäkustannuksia. Tällaisesta tapauksesta voi-

daan kuitenkin vetää väärät johtopäätökset ja seuraavalla kerralla erehtyminen voi olla kallista.

Joskus on vaikea päättää kuinka kokonaisvaltaisena optimointia toteutetaan. Koko rakennuksen optimointi on huomattavasti vaikeampi kuin jatkuvan palkin. Suunniteltaessa rakennetta, joka koostuu perinteellisestä laatta-palkki-seinä-pilari-yhdistelmästä, on rakennetyypin ja perusmittojen määräämisen jälkeen helppoa jakaa optimointitehtävä osiin, jotka ovat toisistaan lähes riippumattomia (7). Silloin edetään tavallisessa suunnittelujärjestyksessä ja optimoidaan osa kerrallaan. Menettely on mahdoton suorittaa, jos rakenne on esim. kuori tai jokin muu integroitu rakenne. Silloin on pakko käsitellä koko rakenne yhdellä kertaa. Kysymys kokonais- ja osittaisoptimoinnista on tähän mennessä jo laskentateknisistä syistä kallistunut miltei kokonaan osittaisoptimoinnin puolelle.

4. Apuneuvot

Edellä esitettyjen ongelmien ratkaisemiseksi on olemassa koko joukko keinoja. Parhaimmat niistä, jotka itse asiassa alkavat aivan uuden kauden optimoinnin historiassa, ovat uusia ja teknisen kehityksen mukanaan tuomia. Meillä ne ovat suurelta osaltaan vähän tunnettuja ja vähän käytettyjä.

Vähemmän merkityksellisten muuttujien löytämiseen voidaan käyttää ns. herkkyysanalyysia. Sillä tarkoitetaan menettelyä, jossa muunnellaan hieman kunkin muuttujan arvoa muiden pysyessä vakiona ja katsotaan mitkä vaikuttavat funktioon voimakkaimmin. Pyritään siis eräänlaisten gradienttien etsimiseen. Esimerkiksi jos edellä mainitut viisi muuttujaa on valittu kymmenen muuttujan joukosta, joista jokaiselle on annettu neljä arvoa, on muuttujien tärkeysjärjestys selvitetty 40 laskennalla ja säästetty $10^{10} - 10^5$ laskentaa. On huomattava, että herkkyysanalyysi on suoritettava minimikohdan lähistöllä, muuten voidaan saada virheellisiä

tuloksia. Herkkyysanalyysi sopii myös funktion minimin loivuuden ja stabiilisuuden tutkimiseen.

Jos funktio on kirjoitettavissa kaavana ja reunaehdot matemaattisin lausekkein ilmaistavissa, on ehdottomasti käyttökelpoisin menettely funktiosta ja sen reunaehdoista riippuen joko lineaarinen tai epälineaarinen ohjelmointi tietokonetta käyttäen. Lineaarilla ohjelmoinnilla voidaan nimittäin minimoida useamman muuttujan lineaarinen funktio annettujen lineaaristen epäyhtälöiden rajoittamalla alueella (16). Nykyiset tietokoneohjelmat perustuvat yleensä Simplex-menetelmään tai sen muunnoksiin, joilla optimi-tulos saadaan hyvin nopeasti muutaman prosentin tarkkuudella. Ohjelmat pystyvät käsittelemään tehtäviä aina tuhanteen varsinaiseen muuttuajaan ja satoihin reunaepäyhtälöihin asti.

Rakenteiden suunnittelussa ei edellä selitetty menettely ole kovinkaan yleistä. Tavallisesti funktion kunkin arvon laskemiseksi on suoritettava rakenteen mitoitus alusta loppuun asti. Joitakin lineaarisen ja epälineaarisen ohjelmoinnin sovellutuksia on kyllä olemassa mm. lähinnä teräsrakenteihin soveltuva plastisuusteoriaan perustuva minimipainomenetelmä, vrt. esimerkki 2. Yleisemmässä tapauksessa tehtävän muotoilu tulee kuitenkin vaikeaksi, mutta tietokonetta voidaan edelleen käyttää apuna. Kun konstruointimenettely on kerran ohjelmoitu, toistaa tietokone sen niin monta kertaa kuin halutaan valittamatta työn paljoutta ja yksitoikkoisuutta. Ohjelma sinänsä ei ehkä sovellu suoraan optimointiin, koska lähtötietojen antaminen erikseen jokaista laskentakertaa kohti on työlästä ja tulokset joudutaan käsittelemään edelleen lopullisten tulosten saamiseksi. Nämäkin työt voidaan antaa tietokoneelle tekemällä ohjelmaan tarvittavat muutokset. Rakennesuunnittelijan ei tarvitse olla ATK-asiantuntija, sillä ohjelma-muutokset voidaan helposti tehdä rakennusteknisiin tietokonesovellutuksiin erikoistuneissa palvelulaitoksissa. Rakentamisajan ja

-kustannusten optimointiin tarjoavat toimintaverkko-ohjelmat hyvät mahdollisuudet. Numeeriset maastomalliohjelmat taas ovat sopivia rakennusten yms. korkeusase-man optimointiin maansiirtokustannusten minimoimiseksi. Eräät rakennesuunnittelijathan ovat ottaneet tämänkin tehtävän toimintamuotoihinsa.

Jos optimointiprobleema tuntuu liian laajalta, on vielä mahdollisuus yrittää jakaa tehtävä pienempiin osiin, ts. siirtyä kokonai-soptimoinnista osittaisoptimointiin. Niinkuin edellä jo on todettu, tämä ei ole mahdollista integroiduille rakenteille, vaan silloin on lähinnä tietokonetta tai esim. pienoismalleja hyväksi käyttäen pyrittävä lopputulokseen.

Koska automaattinen tietojenkäsittely tulee valtaamaan Suomessa muutaman vuoden sisällä valta-aseman rutiinilaskelmien suorittamisessa, lienee syytä lyhyesti tarkastella ATK:n mahdollisuuksia ja sen suhdetta insinööriin.

Tietokoneen pääominaisuudet ovat suuri laskentanopeus ja se, että kone toteuttaa sille annetun ohjelman eikä mitään muuta. Tietokone ei voi luoda uutta (17) eikä sitä myöskään voida ohjelmoida suorittamaan tehtävää, jota ei ole yksikäsitteisesti määritelty. Toisaalta juuri tämä pelastaa suunnittelijan työttömyydeltä, koska hän voi käyttää aivojaan ja tietojaan luovaan työhön. Se on kuitenkin mahdollista vain jättämällä tietokoneelle sille hyvin sopiva rutiinilaskenta.

Suunnittelijan on valittava rakennetyyppi ja jonkinlaiset arvot rakennemitoille sekä ilmoitettava, mitä suureita milläkin tavalla muunnellaan. Tietokone suorittaa laskelmat ja antaa tulokset, joiden perusteella lopullinen valinta voidaan tehdä. Tietenkin sama voidaan toistaa usealle rakennetyypille. Esimerkiksi kaarirakenteen kaaren muotoa voidaan muunnella tai sauvarakenne laskea ristikkona diagonaalein tai ilman niitä vieren-del-kehänä. On yritetty optimoida tietokoneella kokonainen rakennuskin antamatta lainkaan lähtömittoja (18). Tulos on kyllä ollut ohjelmoiduissa suhteissa optimi, mutta

kokonaisuutena ottaen huonohko. On otettava lisäksi huomioon, että iteratiivinen suunnittelu voi divergoidakin, jolloin tulosta ei saada lainkaan (19).

Tietokone vapauttaa suunnittelijan luovaan työhön, eikä hän enää turru numerolaskelmien viidakossa. Lisäksi, kuten käytännössä on monesti todettu, tietokone auttaa suunnittelijaa ymmärtämään paremmin rakenteen toimintaa. Näin se laajentaa suunnittelijan näkemystä, lisää kokemuksia ja luo pohjaa uusille mahdollisuuksille.

5. Esimerkit

5.1. Nestesäiliö

Ensimmäisenä esimerkkinä on eräälle suurelle kemiallisen alan yritykselle tehty tietokoneohjelma ympyräsylinterin muotoisen teräksisen nestesäiliön optimimuodon etsimiseksi. Muuttujana on säiliön halkaisijan ja korkeuden suhde ja minimoitavana funktiona säiliön kokonaiskustannukset. Tehtävä on siten yksiulotteinen ja helposti ratkaistavissa muuntelemalla muuttujaa tietyllä välillä pienin askelin.

Esimerkkinä on neljä eri säiliötä, joiden lähtötiedot on annettu kuvassa 2. Säiliöt 1 ja 2 on suunniteltava halvemmalle ja heikommalta teräkselle kuin 3 ja 4. Säiliöt 1 ja 3 taas on oletettu perustettavan halvemmalla kuin 2 ja 4.

Ohjelman toiminta on yksinkertainen. Lyhyen kaavan avulla saadaan säiliön alimman levyn paksuus tietylle säiliön korkeudelle. Hitsausteknisistä syistä on pohjalevy samanpaksuinen. Edeten levyn korkeus kerrallaan ylöspäin tutkitaan milloin levyn paksuutta voidaan pienentää annetun paksuustaulukon puitteissa. Kun konstruointi on suoritettu, on helppo laskea teräsmenekki, maalaus- ja perustan kustannukset. Ohjelma suorittaa konstruoinnin D/H -suhteille 0.5:stä 0.01:n välein aina 2.50:n asti. Laskeminen lopetetaan vasta kun löytyy 50 perättäistä minimiä suurempaa arvoa. Tällä tavoin on haluttu välttää »sahalaitaminimit». Jos minimiksi on tullut 0.5 tai 2.5 jatketaan laskentaa ko. suuntaan kunnes todellinen minimi löydetään.

Koska laskenta on yksiulotteinen ja lyhyt, kestää normaalitapauksen optimointi nykyaikaisella tietokoneella n. 10 sekuntia, jossa ajassa suoritetaan siis 200 säiliön mitoitusta. Jos tehtävä olisi kaksiulotteinen olisi laskettavana $200 \times 200 = 40\,000$ mitoitusta, mikä kestäisi n. puoli tuntia. Tällöin olisi jo tur-

Kuva 2. Esimerkkisäiliöiden lähtötiedot.
The input data of example tanks.

Kuva 3. Esimerkkien tulokset.
The results of examples.

Kuva 4. Osa säiliöitten 1 ja 2 kokonaiskustannustaulukkoa.
Part of the total cost tables of tanks 1 and 2.

2

SÄILIÖN NUMERO	1	2	3	4
Täyttötilavuus	9300.00 m ³	9300.00 m ³	9300.00 m ³	9300.00 m ³
Nesteen tiheys	1.84 g/cm ³	1.84 g/cm ³	1.84 g/cm ³	1.84 g/cm ³
Levyn korkeus	1500.00 mm	1500.00 mm	1500.00 mm	1500.00 mm
Ohuin levy	8.00 mm	8.00 mm	8.00 mm	8.00 mm
Kattolevy	9.00 mm	9.00 mm	9.00 mm	9.00 mm
Katon kaltevuus	12.00 astetta	12.00 astetta	12.00 astetta	12.00 astetta
Varmuuskerroin	1.50	1.50	1.50	1.50
Lujuuskerroin	0.75	0.75	0.75	0.75
Laskentalujuus	20.00 kp/mm ²	20.00 kp/mm ²	30.00 kp/mm ²	30.00 kp/mm ²
Syöpymislisä	0.00 mm	0.00 mm	0.00 mm	0.00 mm
Perustan korkeus	1000.00 mm	1000.00 mm	1000.00 mm	1000.00 mm
Teräksen hinta	1200.00 mk/tn	1200.00 mk/tn	1380.00 mk/tn	1380.00 mk/tn
Perustan hinta	50.00 mk/m ³	150.00 mk/m ³	50.00 mk/m ³	150.00 mk/m ³
Maalauksen hinta	15.00 mk/m ²	15.00 mk/m ²	15.00 mk/m ²	15.00 mk/m ²

3

OPTIMIMITAT SÄILIÖLLE 1

Säiliön halkaisija	28.81 m
Täytöstilan korkeus	14.26 m
d/h	2.02
(Säiliön korkeus	14.76 m)
Kokonaiskustannus	629062.97 mk
* Kustannusten jakaantuminen	
* Vaippa	
* 2.646535920 + 05	
* Pohjalevy	
* 2.346251750 + 05	
* Katto	
* 5.681055810 + 04	
* Perustus	
* 3.277254060 + 04	
* Maalaus	
* 4.020110270 + 04	

Levyjen mitat (mm)

S	Korkeus
8.00	1263.62
8.00	1500.00
10.00	1500.00
14.00	1500.00
18.00	1500.00
22.00	1500.00
26.00	1500.00
30.00	1500.00
34.00	1500.00
38.00	1500.00

OPTIMIMITAT SÄILIÖLLE 3

Säiliön halkaisija	27.93 m
Täytöstilan korkeus	15.18 m
d/h	1.84
(Säiliön korkeus	15.68 m)
Kokonaiskustannus	535373.25 mk
* Kustannusten jakaantuminen	
* Vaippa	
* 2.305856830 + 05	
* Pohjalevy	
* 1.732077800 + 05	
* Katto	
* 6.129599350 + 04	
* Perustus	
* 3.074788910 + 04	
* Maalaus	
* 3.953590070 + 04	

Levyjen mitat (mm)

S	Korkeus
8.00	679.31
8.00	1500.00
8.00	1500.00
8.00	1500.00
12.00	1500.00
14.00	1500.00
16.00	1500.00
20.00	1500.00
22.00	1500.00
24.00	1500.00
26.00	1500.00

OPTIMIMITAT SÄILIÖLLE 2

Säiliön halkaisija	28.81 m
Täytöstilan korkeus	14.26 m
d/h	2.02
(Säiliön korkeus	14.76 m)
Kokonaiskustannus	694608.05 mk
* Kustannusten jakaantuminen	
* Vaippa	
* 2.646535920 + 05	
* Pohjalevy	
* 2.346251750 + 05	
* Katto	
* 5.681055810 + 04	
* Perustus	
* 9.831762300 + 04	
* Maalaus	
* 4.020110270 + 04	

Levyjen mitat (mm)

S	Korkeus
8.00	1263.62
8.00	1500.00
10.00	1500.00
14.00	1500.00
18.00	1500.00
22.00	1500.00
26.00	1500.00
30.00	1500.00
34.00	1500.00
38.00	1500.00

OPTIMIMITAT SÄILIÖLLE 4

Säiliön halkaisija	25.97 m
Täytöstilan korkeus	17.55 m
d/h	1.48
(Säiliön korkeus	18.05 m)
Kokonaiskustannus	593200.91 mk
* Kustannusten jakaantuminen	
* Vaippa	
* 2.604386740 + 05	
* Pohjalevy	
* 1.614245720 + 05	
* Katto	
* 5.304563550 + 04	
* Perustus	
* 7.982779430 + 04	
* Maalaus	
* 3.846423620 + 04	

Levyjen mitat (mm)

S	Korkeus
8.00	50.50
8.00	1500.00
8.00	1500.00
8.00	1500.00
10.00	1500.00
12.00	1500.00
14.00	1500.00
16.00	1500.00
20.00	1500.00
22.00	1500.00
24.00	1500.00
26.00	1500.00
28.00	1500.00

4

VÄLITULOKSIA
SÄILIÖ

1	2
6.391058510 + 05	6.975670520 + 05
6.404921660 + 05	6.991817300 + 05
6.418763910 + 05	7.007938650 + 05
6.408270210 + 05	6.999719720 + 05
6.411351470 + 05	7.015745030 + 05
6.422025170 + 05	7.007337350 + 05
6.425020160 + 05	7.023267730 + 05
6.438669180 + 05	7.039174130 + 05
6.427750830 + 05	7.030508910 + 05
6.441315030 + 05	7.046321990 + 05
6.430220400 + 05	7.037472040 + 05
6.419015510 + 05	7.028507650 + 05
6.432431660 + 05	7.044160280 + 05
6.421052430 + 05	7.035013240 + 05
6.409565900 + 05	7.025755000 + 05
6.422835090 + 05	7.041248330 + 05
6.411177460 + 05	7.031810900 + 05
6.424366740 + 05	7.047216360 + 05
6.437536950 + 05	7.062598750 + 05
6.450690390 + 05	7.077960510 + 05
6.463825240 + 05	7.093299690 + 05
6.476943290 + 05	7.108618270 + 05
6.490042640 + 05	7.123914230 + 05
6.503125790 + 05	7.139190310 + 05
6.516189970 + 05	7.154443470 + 05
6.529237390 + 05	7.169676150 + 05
6.542267560 + 05	7.184887920 + 05
6.555280370 + 05	7.200078580 + 05
6.419845540 + 05	7.066637560 + 05
6.406894910 + 05	7.055857020 + 05
6.368325710 + 05	7.019454340 + 05
6.329569990 + 05	6.982861520 + 05
6.290629720 + 05	6.946080500 + 05
6.302795580 + 05	6.960402230 + 05
6.314945320 + 05	6.974704070 + 05
6.327081010 + 05	6.988988470 + 05
6.339200800 + 05	7.003253390 + 05
6.351306050 + 05	7.017500310 + 05
6.363396440 + 05	7.031728950 + 05
6.375471670 + 05	7.045938950 + 05
6.387532450 + 05	7.060131120 + 05
6.399578480 + 05	7.074305140 + 05
6.411610080 + 05	7.088461390 + 05
6.423626530 + 05	7.102599130 + 05
6.435628590 + 05	7.116719100 + 05
6.447616060 + 05	7.130821220 + 05
6.459589400 + 05	7.144905980 + 05
6.471548330 + 05	7.158972980 + 05
6.483492170 + 05	7.173021640 + 05
6.495422330 + 05	7.187053440 + 05
6.507338050 + 05	7.201067600 + 05
6.492859040 + 05	7.188683880 + 05
6.478285890 + 05	7.176202780 + 05
6.463620760 + 05	7.163626690 + 05
6.475361760 + 05	7.177453440 + 05
6.460549780 + 05	7.164724160 + 05
6.445645530 + 05	7.151899440 + 05
6.457267350 + 05	7.165597770 + 05
6.442219900 + 05	7.152623890 + 05
6.453776050 + 05	7.166250410 + 05
6.438585730 + 05	7.166683440 + 05
6.450077170 + 05	7.153127550 + 05
6.461555910 + 05	7.180223600 + 05
6.309289140 + 05	7.029824910 + 05
6.320315550 + 05	7.042906570 + 05
6.331329890 + 05	7.055973280 + 05
6.342332050 + 05	7.069024880 + 05

d/h = 1.82

minimi d/h
= 2.02

d/h = 2.22

vaudettava parempiin keinoihin, esimerkiksi laskenalla ensin harva verkko, jota sitten tihennettäisiin minimien lähistöllä. Toinen tapa on lähteä annetusta pisteestä gradientin suuntaan minimiä kohti. Suhteelliset minimi havaitaan lähtemällä liikkeelle useasta pisteestä, jolloin joudutaan aina eri minimiin (7). Näin päästäisiin käsittelemään aina neliulotteisia tehtäviä taloudellisesti.

Tietokonelaskennan tulokset on esitetty kuvassa 3. Niiden perusteella voidaan tehdä seuraavat johtopäätökset.

- a) Ilman tietokonetta optimisuhteesta voidaan helposti erehtyä $\pm 10\%$, mikä lisää kustannuksia ainakin 10 000 mk. Ohjelman tekeminen maksoi n. 1 500.— ja yksi laskenta 100.—. Ohjelma kuoletti siten itsensä ensimmäisellä laskennalla ja saavutettu hyöty oli kymmenkertainen investointeihin verrattuna.
- b) Perustan hinnan muutos ei heikomman teräslaadun tapauksessa vaikuttanut optimisuhteeseen. Funktio kyllä jyrkkeni, kuva 4, mutta ei tarpeeksi, jotta suhde olisi muuttunut. Syynä tähän on perustan hinnan pieni osuus kokonaiskustannuksissa. Toisessa tapauksessa taas kallis perusta korotti säiliön korkeutta ja pienssi halkaisijaa. Jos laskenta olisi suoritettu vain säiliölle 1 ja 2, olisi varmaan päätelty, että perustan hinta ei vaikuta lopputulokseen. Säiliöitä 3 ja 4 mitoitettaessa olisi kuitenkin ko. kokemuseräisen tiedon käyttö johtanut n. 50 000.— lisäkustannuksiin.
- c) Säiliön korkeuden ja halkaisijan optimisuhte vaihtelee laajalla alueella lähtötiedoista riippuen. Jos säiliöitä rakennetaan paljon, saattaisi olla edullisinta laskea suunnitteluparametrejä varioimalla mitoitustaulukot. Niistä saataisiin interpoloimalla optimisuhteen arvo käytännössä esiintyville säiliöille. Taulukoista nähtäisiin lisäksi mm. eri tekijöiden tärkeysjärjestys.

Kuvassa 4 on välituloksena otettua säiliöiden 1 ja 2 kokonaiskustannustaulukkoa.

Kuvaan on lisätty minimikohdan ja optimisuhteesta $\mp 10\%$ eroavien suhteiden paikat. Viivoitetuilla kohdilla näkyy selvästi funktion sahalaitaisuus, mikä johtuu levyjen paksuuden hyppäyksellisistä muutoksista.

5.2. Portaalikehä

Toisena esimerkkinä on kuvan 5 mukainen kehä (5), joka on mitoitettava mahdollisimman kevyeksi. Kehän jalat oletetaan keskenään samanlaisiksi ja varmuuskertoimeksi 2.0. Ratkaisumenetelmänä käytetään plastisuusteoriaan perustuvaa minimipainomenetelmää, jonka teoriaan ei tässä tarkemmin puututa. Tarkoituksena on osoittaa, kuinka tietyt rakenteiden suunnittelun ongelmat voidaan muuntaa puhtaasti matemaattiseen muotoon.

Kehää kuormitettaessa se murtuu siten, että taivutusmomenttien huippuarvojen kohdalla rakenne alkaa myödetä, jolloin ko. kohtiin muodostuu plastiset nivelet. Kun niveliä on muodostunut tarpeellinen määrä, muuttuu kehä liikkuvaksi mekanismiksi, jolloin sen katsotaan murtuneen. Plastisia niveliä voi esimerkkikehässä esiintyä pisteissä 1—7, kuva 5. Kuvassa 6 on esitetty joukko erilaisia mahdollisia murtumismekanismeja. Virtuaalisten siirtymien periaatetta käyttäen voidaan laskea toisaalta sisäisten plastisten momenttien nivelissä suorittama työ ja toisaalta ulkoisten voimien tekemät virtuaaliset työt. Sisäisen työn on oltava yhtä suuri tai suurempi kuin ulkoinen työ, jotta rakenne ei murtuisi.

Merkitsemällä palkin plastista kantomomenttia M_a :lla ja pilarien M_b :llä saadaan kuvaan 6 merkityt työepäyhtälöt. Sievennettyinä ne ovat seuraavat.

$$\begin{array}{ll} \text{a) } M_b \geq 6.0 & \text{c) } 2M_a + M_b \geq 17 \\ \text{b) } M_a \geq 2.5 & \text{d) } M_a + M_b \geq 12 \end{array}$$

Jos oletetaan sauvan painon olevan suoraan verrannollinen sen kantomomenttiin (pätee tietyllä alueella, jos ääretön määrä poikkileikkauksia olisi käytettävissä) saadaan kehän painoksi

$$F = c (10M_a + 4M_b + 4M_b)$$

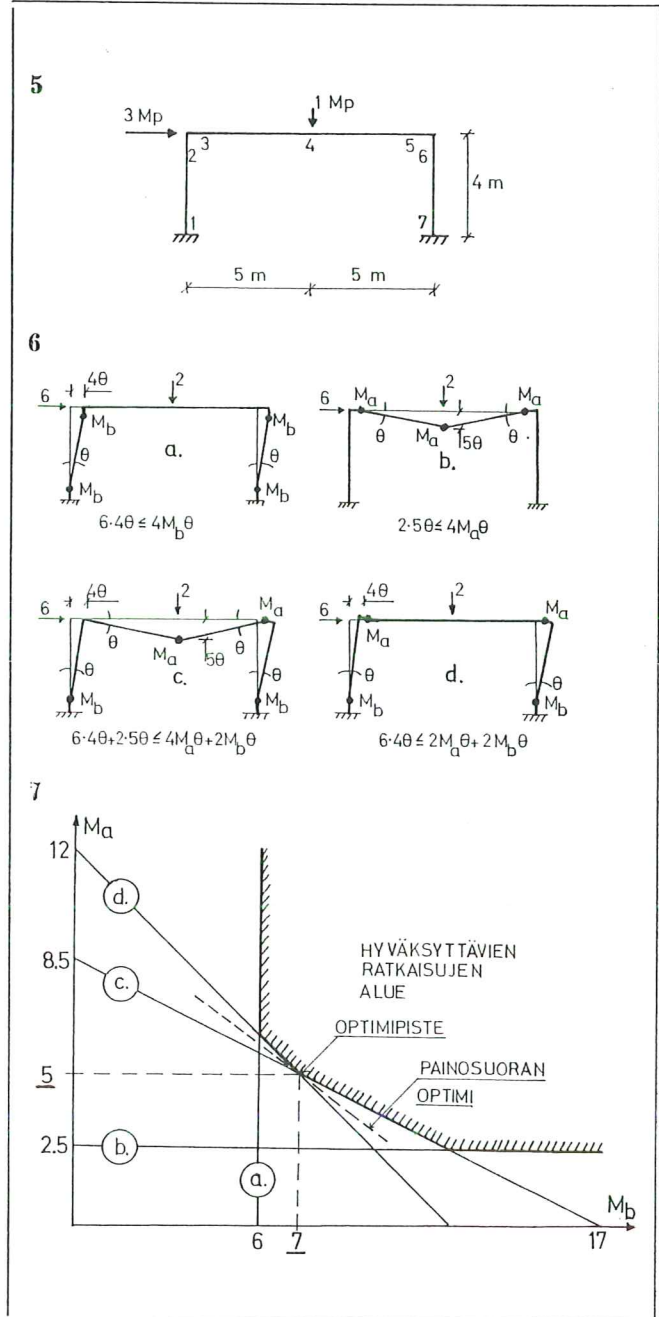
missä kerroin c on sellaisen sauvan metri-paino, jonka kantomomentti on 1 Mpm. Teh-tävämme, funktion F minimointi reunaeh-tojen a...d puitteissa, palautuu lausekkeen $10M_a + 8M_b$ minimointiin samojen reunaeh-tojen alaisena.

Tässä yksinkertaisessa tapauksessa ratkai-su saadaan helpoimmin piirtämällä M_a, M_b -koordinaatistoon reunaehtosuorat, jotka rajoittavat hyväksyttävien ratkaisujen alueen. Se on esitetty kuvassa 7 viivoitettuna. Funktio F esittää suoraa ko. koordinaatistossa, ja kehän paino F on suoran yhtälön vakioter-mi. F :n minimiarvo saavutetaan ilmeisesti siten, että F :ää, »painosuoraa», siirretään koordinaatistossa mahdollisimman alas kui-tenkin niin, että se koskettaa hyväksyttävien ratkaisujen aluetta. Sivuamispiste on mini-mikohta ja tässä tapauksessa ratkaisu on $M_a = 5$, $M_b = 7$ ja $F = 106c$.

Jos erilaisia sauvoja ja siten kantomo-mentteja on enemmän kuin kolme, voidaan käyttää apuna lineaarista ohjelmointia. Jos käytetään tarkempaa painofunktiota, esim. neliöjuurilauseketta, on käytettävä epäli-neaarista ohjelmointia (7, 20) tai vain tiet-tyjä poikkileikkauksia käytettäessä epäjat-kuvaa ohjelmointia (6). Näitä menetelmiä onkin viime aikoina tutkittu paljon ja tehty useita tietokonesovellutuksiakin. Erot johtu-vat erilaisista alkuolettamuksista, murtumis-kriteerioista ja rajoituksista. Niiden etu pe-rinteelliseen yritys-erehdysoptimointiin ver-rattuna on suora ja varma tulokseen pääse-minen, haittana se, että tehtävä on voitava pukea matemaattiseen muotoon.

Loppusanat

Rakennesuunnittelun optimointitehtävänä ei saa olla suunnittelukustannusten mini-mointi. Maassamme kaivattaisiin aivan il-meisesti rakennuttajavalistusta, jolla selvi-tettäisiin milloin suunnittelukustannuksia lisäämällä saavutetaan kustannussäästöjä



Kuva 5. Kehä ja suunnittelukuormat.
Frame with service loads.

Kuva 6. Murtumismekanismeja työyhtälöineen.
Collapse mechanisms with energy inequal-ities.

Kuva 7. Minimipainomitoituksen ratkaiseminen.
Determination of the minimum weight design solution.

alentuneiden kokonaiskustannusten muodossa. Jonkin verran on myös toimittu siten, että rakennuttajalle on jo suunnittelun alkuvaiheessa ehdotettu tavallista perusteellisemmän optimoinnin suorittamista lisäveloituksin. Tämä ei merkitse sen tunnustamista, että ennen ei ole optimoitu lainkaan, vaan menettelytapojen muuttumista kehityksen mukana.

Rakenteiden suunnittelussa, joka on luonteeltaan kertatyötä, on optimoinnista saatava hyöty joskus suhteettoman pieni verrattuna esimerkiksi elementtirakentamiseen (21). Sarjatuotannossa jo pienikin kustannussäästö yhdessä tuotteessa merkitsee suuria summia koko sarjan ollessa kyseessä. Kertatyösäkin kehittyvät suunnittelumenetelmät ja tietokoneiden hyväksikäyttö muuttavat tilanteen kokonaan toiseksi muutaman vuoden sisällä (22). Asiaan vaikuttavat myös Suomeen tulevat aikajakoperiaatteella toimivat tietokoneet, jotka moniajon, rakennesuunnitteluorientoituneiden ohjelmointikielien ja kaukokäytön sekä uusien syöttö- ja tulostusvälineiden (kuten piirturi, näyttölaite ja valokynä) avulla mahdollistavat laskentojen nopean suorituksen suoraan insinööritoimistosta käsin.

Rakenteiden optimointi on laajuutensa ja uutuutensa johdosta ollut viime vuosina alan ulkomaisten tutkijoiden kiitollisena kohteena. Meilläkin olisi optimointi syytä ottaa huomioon täydennyskoulutustilaisuuksia suunniteltaessa. Ovathan rakenteiden optimointimahdollisuudet rajattomat, ja niitä on ennakkoluulottomasti sovellettava jokaiseen tapaukseen, koska jokaisella tapauksella on paras ratkaisunsa.

Kirjallisuutta

- Asuntotuotanto monipuolisemmaksi, *Insinööri-uutiset* no 35, 31. 8. 1968.
- Shanley, F. R., Optimum Design of Eccentrically Loaded Columns, *Proc. of ASCE (J. Struct. Div.)*, 1967, 93 (ST4)4, 210—226.
- Mauch, H. R., Felton, L. P., Optimum Design of Columns Supported by Tension Ties, *Proc. of ASCE (J. Struct. Div.)*, 1967, 93 (ST3), 201—220.
- Megarefs, G. J., Minimal Design of Sandwich Axisymmetric Plates, *Proc. of ASCE (J. Engg. Mech. Div.)*, 1967, 93 (EM6), 245—269.
- Rubinstein, M., Karagozian, J., Building Design Using Linear Programming, *Proc. of ASCE (J. Struct. Div.)* 1966, 92 (ST6), 223—246.
- Toakley, A., Optimum Design Using Available Sections, *Proc. of ASCE (J. Struct. Div.)*, 1968, 94 (ST5), 1219—1244.
- Ridha, R. A., Wright, R. N., Minimum Cost Design of Frames, *Proc. of ASCE (J. Struct. Div.)*, 1967, 93 (ST4), 165—183.
- Zyczkowski, M., Optimum Design of Point-reinforced Cylindrical Shells, *Arch. Mech. stos.*, 1967, 19 (5), 699—713.
- Schulze, G., Zur Optimalen Bemessung Monolithischer Stahlbetonkonstruktionen auf Biegung, *Bauplanung Bautechnik* no. 7, 1968, 331—332.
- Kohli, J., Optimum Design of Concrete Spread Footing by Computer, *Journal of ACI*, May 1968, 384—389.
- Zuk, W., *Concepts of Structure*, New York 1963.
- Feininger, A., *Anatomy of Nature*, New York 1956.
- Lisborg, N., *Principles of Structural Design*, London 1967.
- Kicher, T., Optimum Design, Minimum Weight versus Fully Stressed, *Proc. of ASCE (J. Struct. Div.)*, 1966, 92 (ST6), 265—280.
- Goble, G., De Santis, P., Optimum Design of Mixed Steel Composite Girders, *Proc. of ASCE (J. Struct. Div.)*, 1966 92 (ST6), 25—44.
- Danzig, G., *Linear Programming and Extensions*, Princeton 1963.
- Spillers, W., Artificial Intelligence and Structural Design, *Proc. of ASCE (J. Struct. Div.)*, 1966, 92 (ST6), 491—498.
- Hill, L. Jr., Automated Optimum Cost Building Design, *Proc. of ASCE (J. Struct. Div.)*, 1966, 92 (ST6), 247—264.
- Reinschmidt, K. jne., Iterative Design and Structural Optimization, *Proc. of ASCE (J. Struct. Div.)*, 1966, 92 (ST6), 281—318.
- Brown, D., Ang, A., Structural Optimization by Nonlinear Programming, *Proc. of ASCE (J. Struct. Div.)*, 1966, 92 (ST6), 319—340.
- Rühle, H., Tobisch, F., Zur Optimierung von Schalen- und Faltenträgern, *Bauplanung Bautechnik* no 2, 1968, 78—82.
- King, E., Electronic Computation: Past, Present, Potential, *Proc. of ASCE (J. Struct. Div.)*, 1968, 92 (ST6), 3—24.

Risto Sajaniemi, dipl.ins., Teknillinen laskenta Oy, Helsinki.