

# KAABELKONSTRUKTSIOONIDEST EESTIS JA MAAILMAS

## TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOLI UURIMISTÖÖDE TAUSTAL

*Valdek Kulbach*  
Tallinna Tehnikaülikool

### SISSEJUHATUS

Kaabel- ja kaabeltoetatud konstruktsioonide tähtsaimateks esindajateks on rippkonstruktsioonid, vantsillad ja vantidega toetatud mastid. Rippkonstruktsioonide põhilisteks kasutusalaadeks on ripp-sillad ja katusekonstruktsioonid. Tänapäevaks on suurimad sillaavad lähenenud 2000 meetrile (Akashi Kaikyo sild Jaapanis sildega 1992 m, Suure Belti sild Taanis sildega 1624 m). Juba on koostatud projekt 3300 m avaga ripp-silla jaoks üle Messina väina Itaalias, järke ootab Hispaaniat Marokoga ühendav sild avaga kuni 5000 m. Avadel üle 1000 m pole ripp-sildadel praktiliselt võistlejaid.

Tänapäevaste rippkatuste areng algas 1950ndatel aastatel, katuste silled (läbimõõdud) jäävad piiresse kuni 200–250 m. Samal ajal iseloomustab rippkatuseid suhteliselt suurem mitmekesisus, on ehitatud nii erineva kujundusega tasandkandureid kui ka mitmekesiseid ruumkonstruktsioone. Iga rippkonstruktsiooni põhielementideks on spiraalsete keerdudega terastrossid kas ainult ümartraatidest või kiilukujulistest ja pealispinnal Z-kujulistest traatidest kombineeritud trossid või paralleeltraatidest kimbud. Enamasti on need vabalt painduvad ja nende paindejäikuse arvestamisest võib loobuda. Harvem kasutatakse väiksema või suurema paindejäikusega vardaid (ümarvardad või talaprofiilid). Tavaliselt koosneb rippkonstruktsioon põhielemendist-kaablist, jäigastuselemendist ja toekonstruktsioonist ning kujutab endast eelpingestatud süsteemi. Jäigastuselemendiks on kas pingestuskaabel (rippkatustes) või jäikustala (ripp-sildades).

Süsteemi eelpingestus realiseerub kontaktkoormuse kaudu peakaabli ja jäigastuselemendi vahel.

Kontaktkoormus kujutab endast tegelikkuses teatava sammuga rakendatud koondatud jõudude süsteemi, kusjuures nende arv võib olla suhteliselt suur. Praktilisel projekteerimisel kasutatakse arvutuse lihtsustamiseks kahte võimalikku asendusmudelit:

- sõlmede arvu vähendamine koos rakendatud jõudude suuruse ja sammu vastava suurendamisega; ruumsete võrkkonstruktsioonide puhul tuleb vastavalt suurendada ka kaablite ristlõikepindala;
- kindla sammuga rakendatud koondatud koormuste asendamine pideva joon- või pindkoormusega (asendades viimasel juhul tegeliku kaablitesüsteemi fiktiivse kahekihilise membraaniga, millest kumbki töötab tõmbel ühes suunas).

Enne järgneva juurde asumist tuleb autori arvates teha teatud korrektiive trossidest ehitatud konstruktsioonide alasesse eestikeelsesesse terminoloogiasse. Tähtsaimaks täpsustuseks peaks olema terminite TROSS ja KAABEL eristamine. Ehitusalases terminoloogias on terminid tross seni kasutatud enamasti nii toote kui ka konstruktsioonelemendi tähenduses (samaväärselt näiteks tala või kaarega). Peamiseks põhjuseks tundub siin olevat vene keele mõju. Konstruktsioonelementi tuleks siiski nimetada analoogiliselt inglise ja saksa keelega ka ehitusala terminoloogias kaabliks (inglise *cable* ja saksa *Kabel*). Seni on eesti keeles seda terminit rakendatud ehitusalal ainult liitsõnas KAABEL-KRAANA. Kaablite abil ehitatud konstruktsiooni mõistet ei asenda ka kitsama tähendusega termin RIPPKONSTRUKTSIOON.

Termini laiendatud kasutamisel võiksime rääkida KAABELTOETATUD (inglise keeles *cable-supported*) konstruktsioonidest ja KAABELVÕRKUDEST. Siia kuuluksid nii rippkonstruktsioonid ja vantsillad (vandi all tuleks mõista sirget või ainult omakaalu mõjul väikest ripet omavat kaablit) kui ka vantidega mastid. Ehitusala terminoloogia selline korrastamine kõrvaldaks senise ebaselguse ter-

mini tross kasutamisel. Rippkonstruktsioonide kasutamise efektiivsus sõltub põhiliselt kaablite horisontaaljõu tasakaalustamise moodusest. Tasandkonstruktsiooni kaabli ankurdamisel kaldvantide abil mängib olulist rolli viimaste kaldenurk, kaabelvõrgu puhul on tähtsaimateks teguriteks kontuuri kuju ja jäikus.

## RIPP- JA VANTKONSTRUKTSIOONIDE ARENGUST

### RIPP- JA VANTSILLAD

Rippsillad on ajalooliselt palju vanemad kui rippkatused. Kui jätta kõrvale ajaloolised looduslikest kiud(roog-)materjalidest kaablitega elementaarsed üleviigud, võib tänaste ripsildade eelkäijateks lugeda järjestikustest lülidest koostatud ahelsildu ning nendega samasse liiki kuuluvaid kettsildu. Tänapäevaste ripsildade (foto 1) põhielementideks on peakaablid (need moodustatakse kas valmis trossidest, nende kimpudest või paralleeltraatide kimpudest) ning nende külge rippurite abil ühendatud jäikustalad koos sõidutee elementidega. Rippsilla peakaablid toetatakse püloonidele, mille ülemised otsad ühendatakse kas sirgete või silla külgsilteid katvate talade poolt koormatud ankurvantide kaudu ankurvundamentidega (ankurplokkidega). Sügava veekogu korral võib ankurvandid ühendada massiivsete ankurplokkide asemel silla jäikustalade otste külge (nn iseankurduv sild). Sel puhul on jäikustalad lisaks paindele koormatud ka pikijõududega, talade otsi toetavad sambad on aga koormatud ainult vertikaaljõududega.

Kaasaja ripsildadel pole võistlejaid suurte avade katmisel. 1000 m piir ületati juba 1931. aastal – Georg Washingtoni sild USA-s. Sellele järgnes arvukalt teisi ripsildu USA-s, kaasa arvatud Kuldvärava sild kesksildega 1280 m. Tähtsat osa ripsilla käitumises mängivad jäikustalad. I-profiiliga jäikustalade kõrguse ülemäärane vähendamine viis 1940. aastal Tacoma silla varisemisele puhangulise tuule toimel. Pärast seda hakati enam tähelepanu pöörama jäikustalade ristlõike kuju valikule. Voolujoonelise ristlõikega jäikustala kasutamisel on selle kõrgust vähendatud alla 1 : 400 sildest.

Lisaks voolujoonelise ristlõikega täisseinastele taladele kasutatakse jäikustaladena ka paralleelvöödega sõrestikke. Vaatamata varasemast suuremale selgusele silla jäikustalade ristlõike valikul, soovitavad sildade projekteerimismid viia enne ripsilla ehitamist läbi mudelkatsetused tuuletunnelis.

20. sajandi teisel poolel kandus suureavaliste ripsildade ehitus Euroopasse (Forth Road sild avaga 1006 m Šotimaal, Tagus sild avaga 1013 m Portugalis, Hõga Kusteni sild avaga 1210 m Rootsis ning Humberi sild 1981. aasta kohta rekordilise 1410 m avaga), sajandi lõpul aga Aasiasse (Tsingma sild Hong-Kongis 1977. aastast sildega 1377 m, Yangtze sild 1998. aastast sildega 1385 m Hiinas ning sissejuhatuses nimetatud Akashi Kaikyo sild Jaapanis). Eestis seni ehitatud ripsildu esindavad tagasihoidlike avadega (kuni 60 m) rekonstrueeritud ajalooline Viljandi ripsild (projekti koostas käesoleva artikli autor koostöös prof Siim Idnurmega, foto 2), Võru linna Rooside saarega ühendav sild ning Jakobsoni talu-muuseumi juurde ehitatud Kurgja ripsild. Ka Soomes ehitatud ripsildade avad on suhteliselt tagasihoidlikud – suurima kesksildega (220 m) on Karjalansalmi ripsild.

Vantsildade põhiliseks eeliseks võrreldes ripsildadega ongi ankurplokkide puudumine ning jäikustala lihtsam montaaž. Samal ajal nõuavad nad kõrgemaid püloone ning raskemaid jäikustalasisid. Ripsildadega võistlusvõimelised on nad keskmistel silletel (200–800 m). Senised rekordid kuuluvad Prantsusmaal 1999. aastal ehitatud Normandia sillale (foto 3, sille 856 m) ja 1999. aastal Jaapanis ehitatud Tatara sillale (sille 890 m). Neid re-

kordeid on purustamas Hiina, kus on ehitamisel vantsild kesksildega üle 1000 m. Eestis ehitatud vantsildadest võib esile tuua Tartu ja Pärnu ning autori konstrueeritud Linnamäe hüdrojaama (foto 4) vantsildu.

Foto 1.  
“Hordlandi kolmnurga” üks ripsildadest  
Norras.

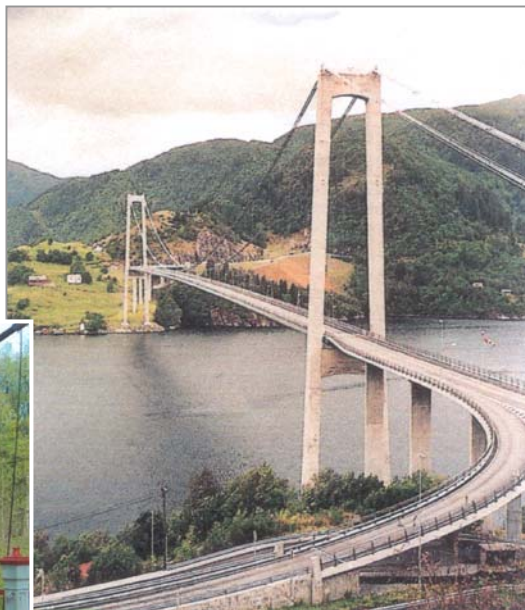


Foto 2.  
Viljandi ajalooline ripsild pärast  
restaureerimist.

Foto 3.  
Rekordilise sildega Tatara  
vantsild Jaapanis.



Foto 4.  
Jägala jõe vantsild Linnamäe hüdroelekt-  
rijaama juures.

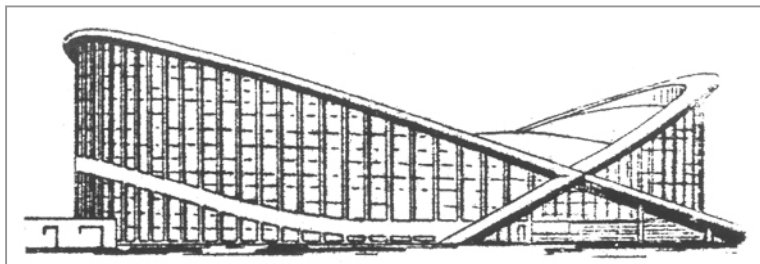
## RIPPKATUSED

Rippsildade pikemaajalise arengu taustal on tänapäevaste rippkatuste ajalugu suhteliselt lühike. Esimesed märkimisväärsed näited kuuluvad 1950ndatesse aastatesse. Neist ühe märkimisväärsema – USA-s 1953. aastal valminud Raleigh-Arena kahele kaldkaarele toetatud võrkkatuse (joonis 1) konstruktsiooni võnkumine tuule toimel nõudis katuse lame osa kandekaablite ühendamist hoone välisseintega lisakaablite abil. Püüdlused ripp-sillale omaste konstruktsioonide ülekandmiseks katusekonstruktsioonidele saavutasid küll mõningat levikut tänu Rootsi inseneri D. Jawerthi projektidele, kuid ankurvante aladel tekkivatele “surnud tsoonide” tõttu jääb nende kasutamine piiratuks. See võib osutada otstarbekaks vaid siis, kui kaablid saab ühendada tribüünialuste kaldtalade otstega või külglöövide korrusraamidega.

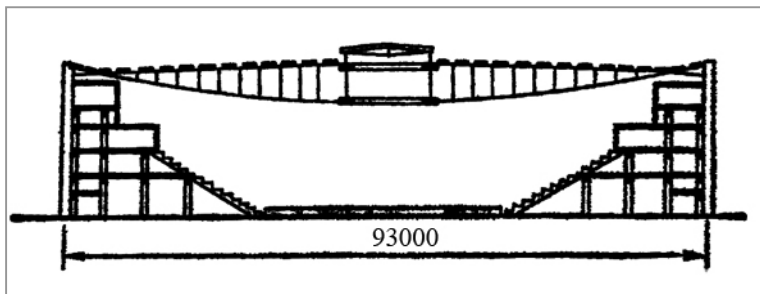
Rippkonstruktsioonide kasutamise tähtsam areng katusekanduritena on seotud kaabelvõrkude ning radiaalkaablite süsteemi kasutamisega. Mõlemal juhul tuleb lugeda põhivariandiks eelpingestatud kahekordse kaabelsüsteemi (kande- ja pingestuskaablid) kasutamist. Kontuurirõngale toetatud radiaalkaablitega konstruktsiooni korral, olenevalt kande- ja pingestuskaablite vastastikusest asendist, võib katuse olla kas kumer (siseruumis kujuneb kande-

kaablite nõgus lagi) või nõgus (sadevee ärajuhtimine nõuab radiaalsuunalise torustiku kasutamist). Sobivaks võib osutada kahe kontuuri- ja kahe tsentrirõngaga kombineeritud variant (joonis 2). Hoone interjööri kujundamiseks pakub variante sadulakujuline rippkatuse. Enamik seni ehitatud katuste puhul on kaabelvõrk toetatud kahest tasapindsest kaldkaarest kontuurile. Katusepinna lame-dad tsoonid kaare luku piirkonnas on ebasoodsad tuule puhangulise toime seisukohalt. (Tallinna laululava erakordse kujuga kõlaekraani (foto 5) puhul takistavad võnkumist suhteliselt suure paindejäikusega katusepaneelid). Kontuurikaarte toetamiseks tuleb kasutada massiivseid kontraforsse (foto 6).

Sujuva katusepinna saame hüpari (hüperboolse paraboloidi) kujulise kaabelvõrgu kasutamisel. Sellist võrgu pinda saab kõige sobivamalt rakendada plaanis ellipsikujulise kontuurirõnga korral. Meie ettepaneku alusel võib kontuurirõnga kokku monteerida 16–32 (5–8 erinevast) torulõigust, mis keevitatakse omavahel ellipsikujuliste põkkõmblustega. Sobivaks näiteks on Tartu laululava kõlaekraan (foto 7), mis on tavalisest katusest keerukama toetusega. Selle konstruktsioonid modelleeris ja projekteeris käesoleva artikli autor koostöös prof Karl Õigeri ning ehitiste projekteerimise instituudi aspirantidega.



Joonis 1.  
Kaartele toetuv Raleigh Arena võrk-rippkatuse USA-s.



Joonis 2.  
Peterburi spordipalee radiaalkaablitega rippkatuse.

Foto 5.  
Tallinna laululava üldvaade.

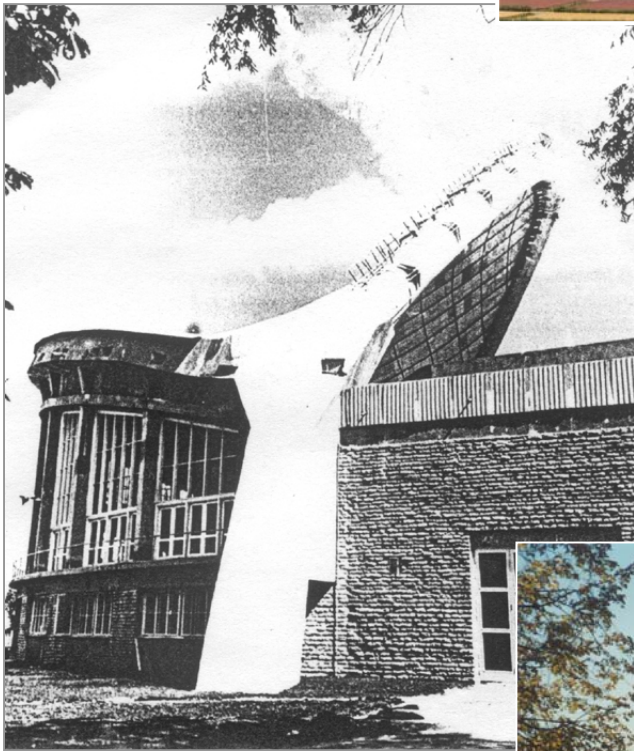


Foto 6.  
Tallinna laululava kõlaekraani kontuurkaared toetuvad massiivsetele kontraforssidele.



Foto 7.  
Tartu laululava üldvaade.

## KAABELKONSTRUKTSIOONIDE UURIMISEST, ARENDAMISEST JA PROJEKTEERIMISEST TTÜs

Rippkonstruktsioonide uurimine TTÜ (sel ajal TPI) ehitusteaduskonnas 1950ndate aastate lõpus oli seotud probleemidega Tallinna laululava uni-kaalse kõlaekraani projekteerimisel “Eesti Projektis” (projekti autor arhitekt Alar Kotli). Tähelepanu väärib asjaolu, et enne seda oli ehitatud vaid üksikuid sadulakujulisi rippkatuseid. Tallinna laululava kõlaekraani kujundamist komplitseeris selle esikaare vahepealsete tuge puudumine (toetamine ainult otsmistele kontraforssidele). Prof Heinrich Lauu esialgsete konstruktiivsete kaalutluste alusel ehitati selleaegses ehituskonstruktsioonide kateedris terastraatidest võrgu ja raudbetoonist kontuurikaartega mudel (M 1 : 20), mille katsetamise (dots Allan Sumbak) tulemused ning esialgsed ligikaudsed kontrollarvutused olid aluseks kõlaekraani põhimõõtmete valikul. Nimetatud mudelit kasutati pärast kaablitevõrgu katmist puitlaudisega ka ekraani akustiliste omaduste hindamisel (prof Helmut Oruvee).

Ekraani ehitustööde käigus asendati kaablitevõrku toetav algselt raudbetoonist projekteeritud esikaar osaliselt betooniga täidetud terastoruga. Seda asendamist on küll korduvalt kritiseeritud, kuid käesoleva artikli autori arvates oli see õigustatud nii ehitustööde kiirendamise (laulupidu oli ukse ees) kui ka kaare vajaliku väändejäikuse tagamise seisukohalt. Küll võiks tänaste teadmiste alusel väita, et esikaare valmistamiseks oleks võinud kasutada mõnevõrra väiksema läbimõõduga (1,6 m 2,0 m asemel) terastoru. Ekraani kaabelvõrgu pingestamise ajal tuli allakirjutajal koos oma selleaegse kolleegi prof Johannes Aarega lahendada rida tehnoloogilisi probleeme. Neist tähtsamateks olid kaablite sisejõu mõõtmise seadme konstrueerimine ja tareerimine ning kaablitevõrgu pingestamiseks vajalike seadmete projekteerimine. Viimaste hulka kuulusid pikaõlaliste võtmete haardesõlmed ning suhteliselt suurte (kuni 300 kN) eelpingestatud realiseerimiseks vajalike tugilaagrite ja dubleeritud (pingestamis- ja fikseerimis-) mutritega tugiosad. Kõlaekraani ehitamisele järgneval aastal toimusid konstruktsioonide vii-

mistlustööd koos võrgukaablite sisejõudude täiendava reguleerimisega. Viimane viis vaid piiratud tulemuseni, säilis sisejõudude teatav ebahütlus ning märgatav erinevus võrreldes projekteeritud suurustega.

Tallinna laululava kõlaekraaniga seotud probleemid ajendasid käesoleva artikli autorit jätkama tööd rippkonstruktsioonide, aga ka teiste kaabeltoetatud konstruktsioonide (vantidega toetatud montaažimastid) uurimisel. Alates 1960ndatest aastatest juhendas autor aspirante (hiljem magistrante ja doktorante), kelle väitekirjad puudutasid erinevaid rippkatuseid, hiljem ka rippildu ja kaabeltoetatud tõstemaste. Sirgetest varrastest kontuuri ja kaablitevõrgu koostööd uuris Jüri Engelbrecht, kahest tasandkaarest kontuuriga rippkatuse käitumist Karl Öiger, elliptilise kontuurirõngale toetatud ortogonaalse võrgu käitumist Arvi Rava-soo, hiljem ka Tiina Hallang ja Indrek Tärno. Kombineeritud elementidest kontuuri ja kaablitevõrgu koostöö uurimisele olid pühendatud Urmas Männi ja Andres Talviku tööd.

Vastavate publikatsioonide ülevaade on toodud Eesti Teaduste Akadeemia Toimetiste erinumbris [Special issue..., 2002] Nende tööde koostamise ajal võeti kasutusele autori poolt põhjendatud meetod (koos vajalike tingimuste arvestamisega) pingelekkude superpositsiooni printsipi kasutamiseks geomeetriliselt mittelineaarsete konstruktsioonide arvutamisel [Kulbach, 1999]. See võimaldas kontinuaalse arvutusmudeli rakendamist ühepoolsetel koormatud konstruktsioonidele. Vajalikku tähelepanu pööras autor ka eelpingestatud rippkonstruktsioonide algkuju määramisele ning kaabelvõrgu pingestamise strateegia väljatöötamisele.

Seni põhiliselt võrkkatuste jaoks kasutatud arvutusmetoodikat laiendati 1960ndate aastate lõpul üksikkaablitele ning kande- ja pingestuskaablitega eelpingestatud tasandkonstruktsioonidele [Kulbach, 1995b]. Hiljem leidsid lähemat käsitlemist radiaalkaablite ja ringikujulise kontuurirõngaga rippkatuste arvutamise küsimused [Kulbach, Lääne,

1999], aga ka erinevate rippkonstruktsioonide dünaamikaprobleemid [Engelbrecht, 1971]. Kaabelkonstruktsioonide uurimise ja projekteerimise omaette valdkonna moodustasid montaažimaste toetavate vantide kui eritüüpi (eelpinge suhtes eriti tundlike) kaablite arvutusküsimused, mis on lähedalt seotud raskete seadmete ning kütuse-reservuaaride montaaži probleemidega. Mastkraana viimase tüübi mudeli katsetamist ning sellele vastava 1000-tonnise massiga reaktori montaaži illustreerivad fotod 8 ja 9.

1980ndate aastate lõpul kerkisid päevakorda Tartu laululava autori poolt pakutud lahendusele vastava hüparikujulise kaabelvõrguga kõlaekraani projekteerimise ja tegeliku töö uurimise küsimused. Ehitati mudel (M 1 : 10), mille katsetamisega pidi me kindlaks tegema ühepoolset toetatud elliptilise kontuuriga konstruktsiooni käitumise iseärasused [Kulbach, 1995a]. Prof K. Õigeri ettepanekul võeti arvesse kaablitevõrgu koostööd kolmekihilise puitlaudisega. Autori aspirant Peeter Paane viis läbi mudeli staatilise katsetamise ning K. Õigeri

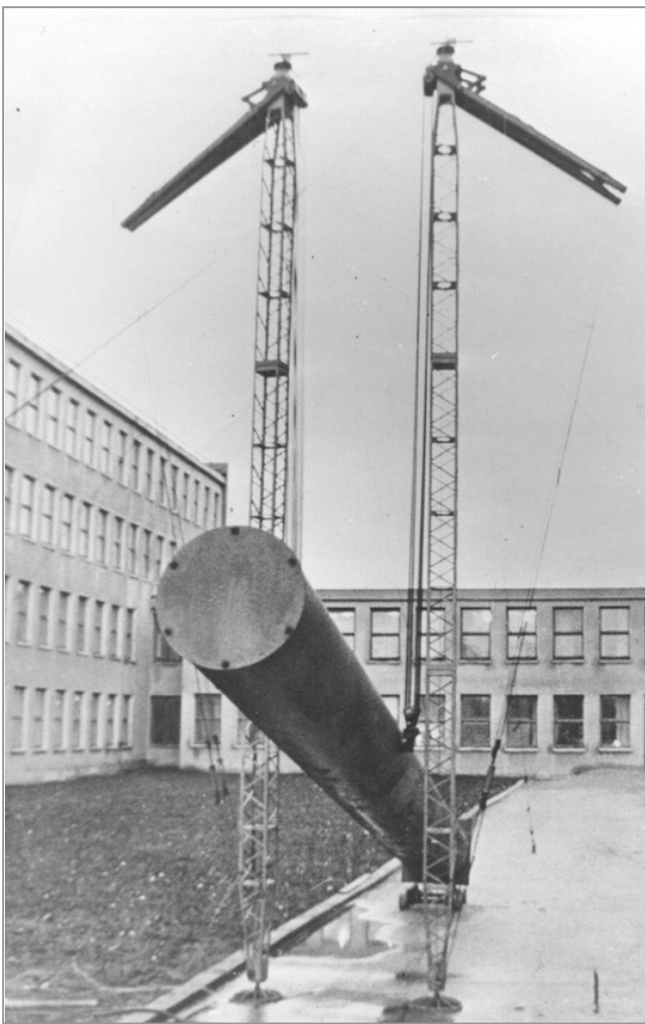


Foto 8.  
1000 t tõstejõuga mastkraana mudeli katsetamine TTÜs.

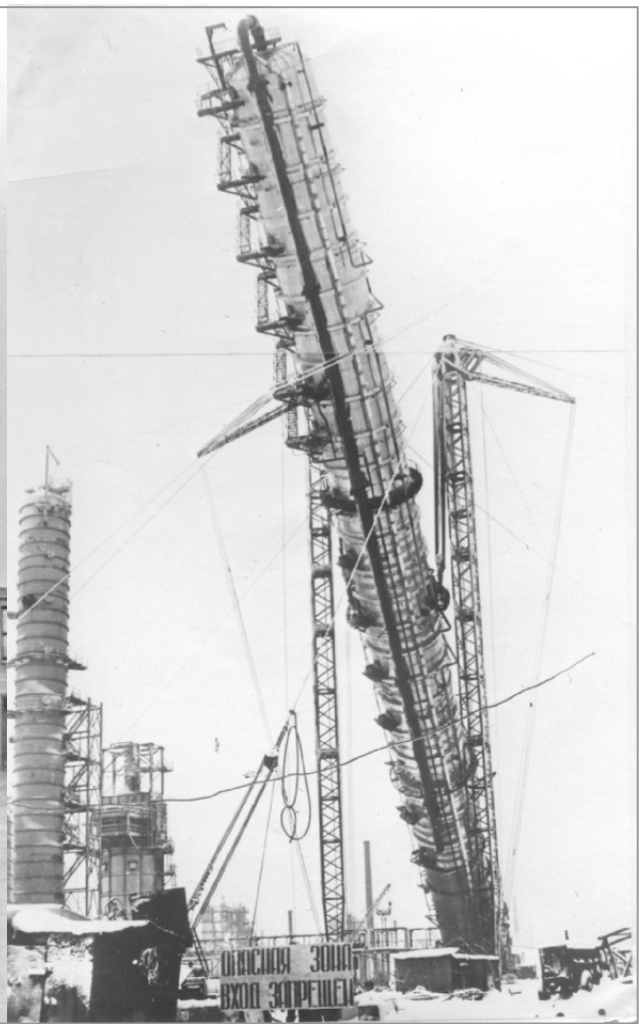


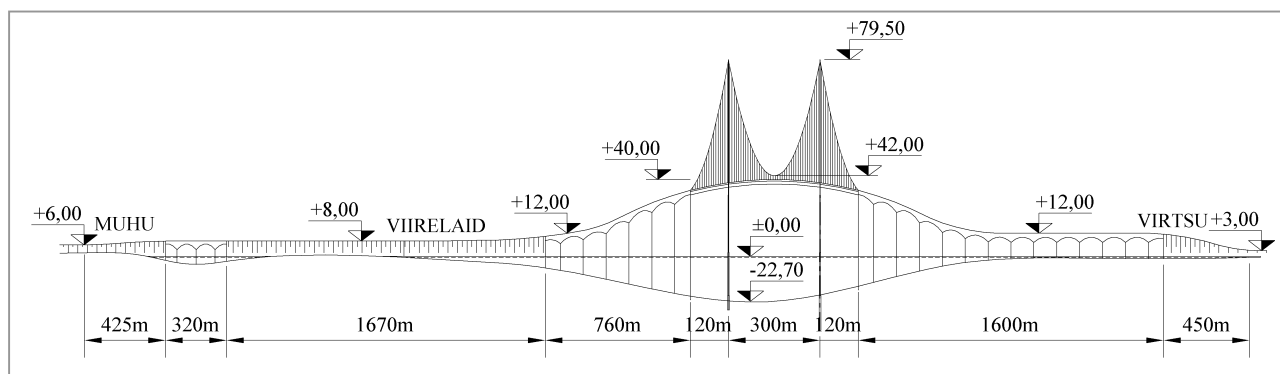
Foto 9.  
TTÜ osavõtul loodud mastkraana 1000 t reaktori montaažil.

aspirant Ivar Talvik konstruktsiooni dünaamilise käitumise uurimise [Õiger, Talvik, 2001]. Kõlaekraani projekteerimise ja ehitamise ajal tuli käesoleva artikli autoril koos prof K. Õigeriga lahendada arvukalt tehnoloogilisi ja tehnilisi küsimusi. Algselt ette nähtud spiraaltrossid asendati ümarterasest varrastega. Konstrueeriti ümarvarraste ankurdussõlmed ja pingutuslукud, lahendati ekraani puitlaudise kontuurirõnga ühendamise probleemid jne, jne.

Käesoleva artikli autori tegevus rippildade valdkonnas algas üksikkaabli arvutusmetoodika laiendamise taladega jäigastatud rippkonstruktsioonidele [Kulbach, Talvik, 2001], kus lisaks kirjandusest teadaoleva metoodika analüüsile töötati välja lihtsustatud arvutusmeetod, milles üksikkaabli arvutusparameetrina esineb vaid jäikustala suhtelise paindejäikuse parameeter. Meetodi esimeseks rakenduseks praktikas oli Viljandi lossisilla rekonstrueerimise projekt (koos prof Siim Idnurmega). Tõsisemal kujul kerkisid rippildade uurimise ja projekteerimise küsimused päevakorda seoses osavõtuga tolleaegse Saare maavanema Juhan Saare juhitud Saaremaa püsiühenduse komisjoni tööst. Eesti Maanteed Tehnokeskuse tellimuse ning Eesti Teadusfondi grantide alusel tehti erinevate sillavariantide (eeskätt selle keske, laevatatava osa) võrdlev analüüs ning hinnati nende maksumust. Uurimistöös osalesid autori doktorandid Juhan Idnurm ja Egon Kivi ning dots Ivar Talvik.

Suure väina silla tüübi ja kesksilde suuruse valikul olid algselt uurimise all suhteliselt suure (maailmarekordilise või sellele lähedase) sildega rippildad. Suure väina vaatlusalust profiili iseloomustavad suhteliselt järsud sügavuse muutused, mille tõttu suurematele silletele vastab ankurplokkide oluliselt väiksem rajamissügavus ning maht. Arvestades aga rippilla (nagu ka vantsilla) pikkusühiku ca 2,5-kordset maksumust võrreldes tavalise talasillaga, võeti edasise uuringu aluseks laevatatavuse nõudest tulenevaid sillagabariite ning otsustati piirduda sildega 300–480 m. Ehitati tavalise rippilla mudel (M 1 : 100), mis järgnevalt ehitati ümber nn “iseankurduvaks” konstruktsiooniks ning lõpuks kombineeritud ripp-vantsillaks (foto 10). Ümberehituse põhjuseks oli tavalise, sügavate ankurplokkidega silla ning “iseankurduva” rippilla ehitushinna võrdlus erinevatel silletel, mis näitas viimase märgatavalt väiksemat maksumust Suure väina silla trassi reaalse parameetrite puhul. Rippilla täiendamine vantidega on otstarbekas silla jäikustalade montaaži seisukohalt (see on soodus ka silla töötamise seisukohalt ühepoolisel koormamisel). Silla üldskeem on toodud joonisel 3 ja selle keskosa ruumiline kujutus fotol 11.

Kombineeritud ripp-vantsilla projekteerimine nõuab nn diskreetse arvutusmudeli kasutamist. Viimase rakendamist nii tavaliste rippildade kui ka kombineeritud ripp-vantsilla arvutamisel silla üldisel ja ka kohalikul koormamisel kajastavad koos J. Idnurmega avaldatud tööd [Kulbach jt, 2000].



Joonis 3. Saaremaa püsiühenduse üldskeem autori ettepaneku alusel.

Foto 10.  
Suure väina kesksilla mudel TTÜ ehitiste projekteerimise instituudi laboris.



Foto 11.  
Suure väina kesksilla arvutijoonis.



Suure väina silla projekti konstruktiivsete küsimuste lahendamisele lisaks on TTÜ ehitiste projekteerimise instituut teinud prof Ilmar Pihlaku

juhendamisel põhjalikud tasuvus- ja arvamusuuringud [Saaremaa püsiühendus, 2000].

## RIPPKONSTRUKTSIOONIDE KÄITUMIST ISELOOMUSTAVATEST ARVUTUSMEETODITEST

RIPPKONSTRUKTSIOONIDE ARVUTUSPROBLEEMIDE KÄSITLUSEST RAHVUSVAHELISTES VÄLJAANNETES

Rippkonstruktsioonide arvutusmeetodite areng on toimunud koos konstruktsioonide endi arenguga. Seetõttu on rippildade arvutusmeetodite areng

eelnenud rippkatuste arvutusmeetodite arengule. Rippildade arvutamisel kontinuaalse mudeli alusel kasutatakse F. Bleichi koostatud tasakaalu diferentsiaalvõrrandi transsendentset lahendit. Selles sisalduva kaabli jõu sidumiseks silla läbipain-

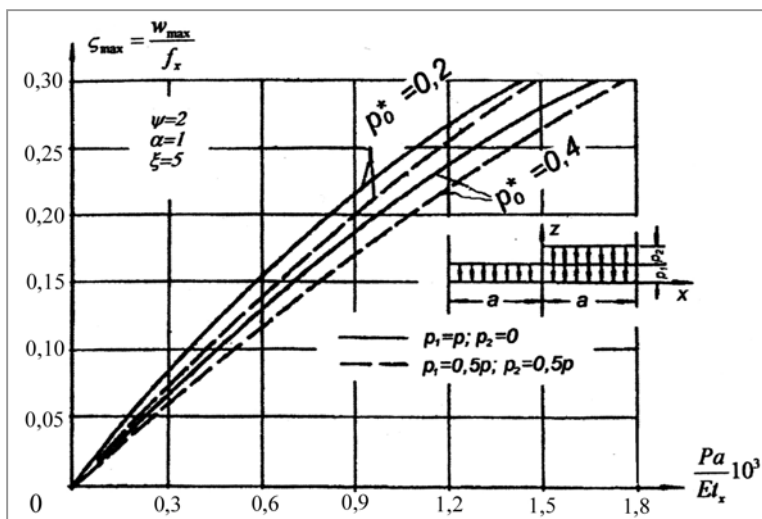
dega võrdsustatakse kaabli üldine pikenemine, lähtudes ühelt poolt silla läbipaindest ning teiselt poolt kaabli sisejõu muutusest. Enamik autoreid on siiski lähtunud diskreetsest arvutusmudelist [Smirnov, 1975; Bangash, 1999], eelistades enamasti kas tavalist või modifitseeritud lõplike elementide meetodit. Eri tüüpi (näiteks “iseankurduvate”) sildade arvutamise küsimusi on käsitletud konkreetsete sildade kontekstis [Ochendorf, Billington, 1999]. Ka tavaliste rippildade projekteerimise probleeme käsitletakse koos konkreetsete sildade kirjeldusega [Clark, 1999; Jorgensen jt, 1999].

Rippkatuste arvutamist käsitlevate trükiste avaldamise buum kuulub möödunud sajandi esimese poole lõpuaastatesse ning sajandi teise poole. Avaldati arvukalt monograafiaid [Otto, Schleyer, 1966; Kosenko, 1966; Kuznetsov, 1969; Dimitrijevič, Kasilov, 1968; Kollar, Szabo, 1984; Leonard, 1988; Buchholdt, 1998] ning korraldati rahvusvahelisi konverentse. Kuigi avaldatud töodes esineb arvukalt soovitusi üksikkaablite ja rippkatuste projekteerimiseks, põhineb enamik neist mudelkatsetuste ja ehituskogemuste kirjeldamisel, neis puudub erinevate konstruktsioonide arvutamise üldistav süsteem. Reeglina lähtutakse mitte täpsetest elastsusõpetuse seostest, vaid lihtsustatud valemitest. Üksikkaabli võrrandites on põhisuuruseks kaabli sisejõud, mille määramiseks kasutatav

kuupvõrrand [Matselinskij, 1950; Katshurin, 1962] on lahendamiseks ebamugav, sageli ka ebatäpne. Seda on raske kohaldada eelpingestatud liitkonstruktsioonide arvutamiseks, sageli on ignoreeritud tugede järeleandvuse mõju arvutustulemustele.

#### TTÜS VÄLJATÖÖTATUD UNIVERSAALSE ARVUTUSMETOODIKA ISEÄRASUSED

- TTÜs väljatöötatud, kontinuaalsel mudelil põhineva universaalse arvutusmetoodika lähteko-haks (erinevalt teistest kirjanduses pakutavatest lihtsustatud meetoditest) on geomeetriselt mit-telineaarse elastsusõpetuse täpsed võrrandid.
- Arvutuse võtmeparameetrik on konstruktsiooni suhteline läbipaine. See määratakse kuupvõrrandist, milles kasutatakse dimensioonita parameetreid (joonis 4). Neis võrrandites on määravaks lineaarne liige, mis võimaldab võrrandit lihtsalt lahendada iteratsiooni teel (ka graafiliselt).
- Kaabli (konstruktsiooni) suhtelise läbipaine kui võtmeparameetri kasutamine võimaldab selle suhteliselt lihtsat rakendamist eelpingestatud liitkonstruktsioonide arvutamisel, tänu põhikaabli ja jäigastuselementide ühistele läbi-painetele. Mittelineaarsete lähtevõrrandite in-tegreerimisel on kasutatud nii täpsed (üksik-kaabli ja pingestuskaabliga eelpingestatud konstruktsiooni puhul) kui ka vajaliku täpsusega ligikaudseid arvutusmudeleid. Ligikaudseid mu-



Joonis 4. Erinevate rippkonstruktsioonide suhtelise läbipaine sõltuvus koormusest.

deleid on kasutatud juhtudel, kui täpne lahend puudub (hüparikujuline rippkatus) või on kasutamiseks tülikas (rippsild).

- Arvutustulemusi (ja konstruktsiooni käitumist) oluliselt mõjutav tugede järeleandvuse võetakse otseselt arvesse kaablite geomeetrisel vastavuse võrrandites (nende integreeritud vormis). Tugede siirded avaldatakse kaabli (võrgu) horisontaaljõudude lineaarse funktsioonina. Selle õiguspärasus on tõestatud autori töödes.
- Konstruktsiooni arvutamiseks ühepoolse (või mõne teise ebasümmeetrilise) koormuse mõjumiis kasutatakse pingeolekute superpositsiooni printsiipi; selle kehtivust geomeetrisel mittelineaarsete konstruktsioonide puhul ja selle rakendamiseks vajalike lisatingimuste arvestamist on kirjeldatud artikli autori varasemates töödes.
- Paralleelselt kontinuaalse mudeliga on välja töötatud kaablite diskreetsetest lõikudest koosnevate konstruktsioonide arvutusmetoodika dubleeritud kaablitest ja talaga jäigastatud

kaablitest konstruktsioonide ning võrk-rippkatuste jaoks. Nende kasutamine on vajalik konstruktsiooni koormamisel suurte kesken- datud jõududega, aga ka juhtudel, kui kontinuaalse arvutusmudeli kasutamine pole otstarbekas.

- Kirjeldatud arvutusmeetodite paikapidavust on kontrollitud TTÜs läbi viidud mudel- katsetuste abil ja ka meil uuritud konstruktsioonide projekteerimise kogemustega nii rippkatuste (Tallinna ja Tartu laululavade kõlaekraanid) kui ka ripsildade (Viljandi lossisilla rekonstrueerimise projekt ja Suure väina silla eelprojekt) osas.
- Erinevate rippkonstruktsioonide arvutamiseks kasutatavaid valemeid iseloomustab nende ühtne struktuur. Kõigi vaadeldavate puhul määratakse konstruktsiooni suhteline läbipaine prevaleeriva lineaarse liikmega kuupvõrrandist (tabel 1). Arusaadavalt lisanduvad võrrandi kordajatesse, aga ka kaablite sisejõudude avaldistesse üleminekul keerukamatele konstruktsioonidele täiendavad kordajad.

## ETTEPANEKUD

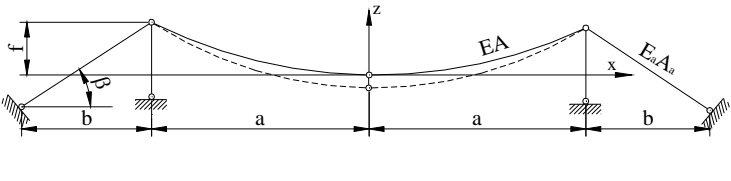
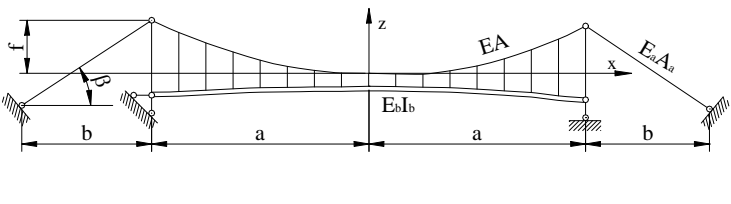
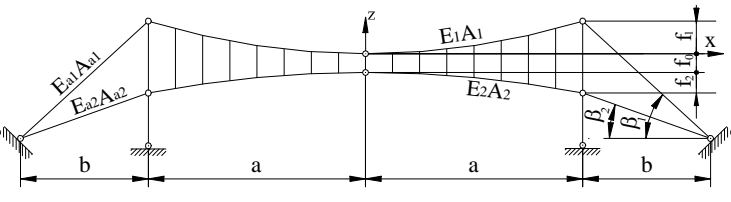
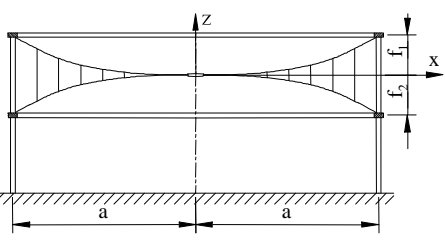
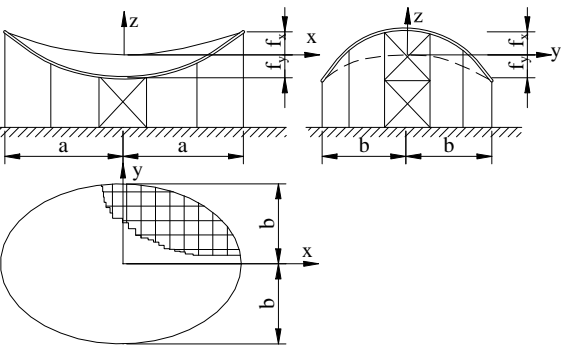
### KAABELKONSTRUKTSIOONIDE EHTUSKOGEMUSTE RAKENDAMISEKS EESTIS

Viimase poolsajandi jooksul on Eesti ehitus- ja projekteerimisorganisatsioonid kokku puutunud mitmekesiste kaabeltoetatud konstruktsioonide valmistamise ja montaaži probleemidega. On loodud unikaalseid võrkkatuseid, huvitavaid ripp- ja vantsildu ning osaletud mitmesuguste side- ja montaažimastide püstitamisel. Samal ajal pole kasutatud kõiki võimalusi seda tüüpi kergkonstruktsioonide laialdasemal rakendamisel, rääkimata spetsialiseerumisest nende projekteerimisel ja ehitamisel. Pole arenenud arvestatav koostöö ehitus- ja projekteerimisorganisatsioonide ning selle ala kõrgkompetentsiga teadlaste vahel. On püstitatud ehitisi, kus efektiivsete rippkonstruktsioonide asemel on kasutatud suurema materjali- ja isegi töömahuga tarindeid. Sellise olukorra peamiseks põhjuseks on meie projekteerijate teatav umbusk ja ehitajate liiga väikesed kaasaegsete kaabeltoetatud

konstruktsioonide ehitamise kogemused. Paljudel juhtudel (näiteks sidemastide puhul) on loobutud konstruktsioonide valmistamisest ja montaažist välisfirmade kasuks.

Allakirjutanu arvates võiks kaabel- ja kaabeltoetatud konstruktsioonide ning nende ehitamise areng Eestis toimuda kas ühe spetsialiseeritud firma käivitamise teel või vastava allüksuse loomise teel mõnes arenenud ehitusfirmas, silmas pidades koostööd Euroopa Liiduga. Selline firma *resp* allüksus võiks oma peale võtta enamiku Eestis, aga ka naabermaades püstitatavate vantidega toetatud mastide ja ripsildade ehitamise, silmas pidades ka lähitulevikus ehitatavat Suure väina silda. Samal ajal võiks välja arendada ka rippkatustega kaetud spordi- ja vaatesaale. Siinkohal on huvitav silmas pidada Hiina kogemust.

Erinevate rippkonstruktsioonide läbipainded ja kaablite sisejõud

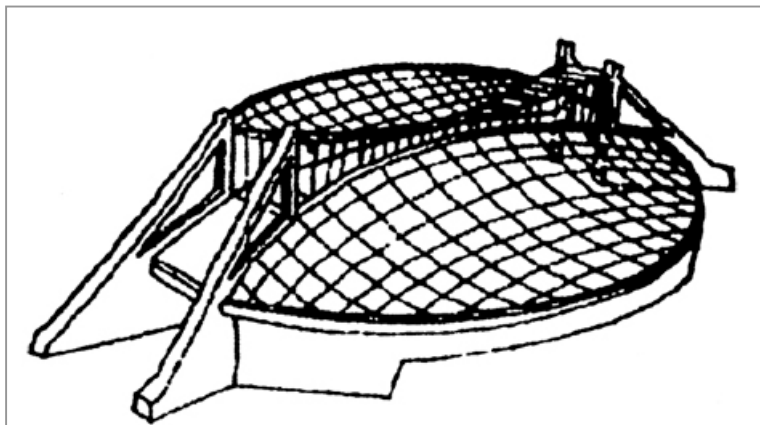
Rippkonstruktsiooni skeem	Kuupvõrand konstruktsiooni suhtelise läbipainde määramiseks
	$\zeta_0^3 + 3\zeta_0^2 + (2 + p_0^*)\zeta_0 = p^*$ $\zeta_0 = \frac{w_0}{f} \quad \delta = \frac{f}{a}$ $p_0^* = \frac{H_0}{\Phi} \quad p^* = \frac{P}{\Phi} \quad P = \frac{pa^2}{2f}$
	$\zeta_0^3 + 3\zeta_0^2 + (2 + \rho + p_0^*)\zeta_0 = p^*$ $\zeta_0 = \frac{w_0}{f} \quad \delta = \frac{f}{a}$ $p_0^* = \frac{H_0}{\Phi} \quad p^* = \frac{P}{\Phi} \quad P = \frac{pa^2}{2f}$
	$(1 + \psi)\zeta_0^3 + 3(1 - \alpha\psi)\zeta_0^2 + [2(1 + \alpha^2\psi) + (1 + 1/\alpha)p_0^*]\zeta_0 = p^*$ $\zeta_0 = \frac{w_0}{f_1} \quad \delta_1 = \frac{f_1}{a}$ $p_0^* = \frac{H_0}{\Phi} \quad p^* = \frac{P}{\Phi} \quad P = \frac{pa^2}{2f_1}$
	$(1 + \psi)\zeta_0^3 + 3(1 - \alpha\psi)\zeta_0^2 + [2(1 + \alpha^2\psi) + p_0^*(1 + 1/\alpha)]\zeta_0 = p^*$ $\zeta_0 = \frac{w_0}{f_1} \quad \delta_1 = \frac{f_1}{a}$ $p_0^* = \frac{H_0}{\Phi} \quad p^* = \frac{P}{\Phi} \quad P = \frac{pa^2}{6f_1}$
	$(1 + \psi + 4\xi)\zeta_0^3 + 3[(1 - \alpha\psi) + 2(1 - \alpha)\xi]\zeta_0^2 + \{2[(1 + \alpha^2\psi) + (1 - \alpha)^2\xi] + p_0^*(1 + 1/\alpha)\}\zeta_0 = p^*$ $\zeta_0 = \frac{w_0}{f_x} \quad \delta_x = \frac{f_x}{a}$ $p_0^* = \frac{H_0}{\Phi} \quad p^* = \frac{P}{\Phi} \quad P = \frac{p_1 a^2}{2f_x}$ $\mu = 1 + 1/\psi$

Tabel 1

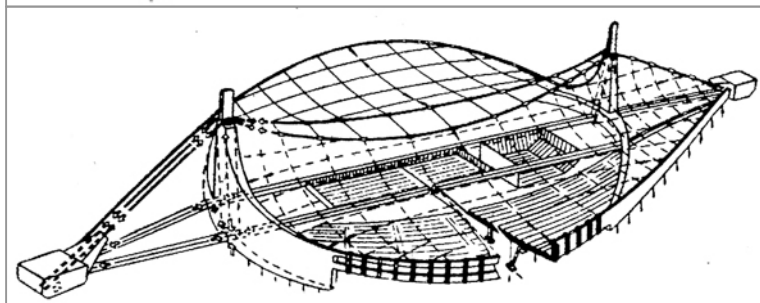
Kaabli sisejõu juurdekasv kN(kN/m)	Kaabli tõmbejäikus kN(kN/m)	Jäikusparameetrid
$H - H_0 = \Phi \zeta_0 (2 + \zeta_0)$	$\Phi = \frac{2EA\delta^2}{3(1 + \kappa + \vartheta)}$	$\vartheta = \frac{EAb}{E_c A_a a \cos^3 \beta}$
$H - H_0 = \Phi \zeta_0 (2 + \zeta_0)$	$\Phi = \frac{2EA\delta^2}{3(1 + \kappa + \vartheta)}$	$\rho = \frac{8 E_b I_b}{3 \Phi a^2}$ $\vartheta = \frac{EAb}{E_c A_a a \cos^3 \beta}$
$H_1 - H_{01} = \Phi \zeta_0 (2 + \zeta_0)$ $H_2 - H_{02} = -\psi \Phi \zeta_0 (2\alpha - \zeta_0)$	$\Phi = \frac{2E_1 A_1 \delta_1^2}{3(1 + \kappa_1 + \vartheta_1)}$	$\psi = \frac{E_2 A_2 (1 + \kappa_1 + \vartheta_1)}{E_1 A_1 (1 + \kappa_2 + \vartheta_2)}$ $\vartheta_1 = \frac{E_1 A_1 b}{E_{a1} A_{a1} a \cos^3 \beta_1}$ $\vartheta_2 = \frac{E_2 A_2 b}{E_{a2} A_{a2} a \cos^3 \beta_2}$
$H_1 - H_{01} = \Phi \zeta_0 (2 + \zeta_0)$ $H_2 - H_{02} = -\psi \Phi \zeta_0 (2\alpha - \zeta_0)$	$\Phi = \frac{2EA\delta^2}{3(1 + \kappa + \vartheta)}$	$\psi = \frac{E_2 A_2 (1 + \kappa_1)}{E_1 A_1 (1 + \kappa_2)}$
$H_x - H_{0x} = \Phi \zeta_0 [(2 + \zeta_0) + 2(1 - \alpha + \zeta_0)\xi]$ $H_y - H_{0y} = -\beta^2 \Phi \zeta_0 [(2\alpha - \zeta_0)\psi - 2(1 - \alpha + \zeta_0)\xi]$	$\Phi = \frac{5Et_x \delta_x^2}{9(1 + \kappa_x)(1 + \mu\xi)}$	$\psi = \frac{Et_y a^4 (1 + \kappa_x)}{Et_x b^4 (1 + \kappa_y)}$ $\xi = \frac{5Et_y a^3 \sqrt{a/b}}{72E_c I_c (1 + \kappa_x)}$

Viimase aja ehitusboom Hiinas haarab mitte ainult kaabeltoetatud sildu, vaid ka massiliselt ehitatavaid rippkatusega spordihooneid. Tähelepanu äratavad Hiina kogemused spordihoonete ehitamisel keskastme koolide juurde. Näitena võib tuua Sichuani Gümnaasiumi ja Chaoyangi Gümnaasiumi hoonete (joonis 5) katusekonstruktsioonid [Recent spatial..., 2006]. Nimetatud hoone võrkkatvus on

lähedane Jaapani olümpiastaadioni katusekonstruktsioonile (joonis 6). Laialdasemaks kasutamiseks Eestis ja meie naabermaades võiks siiski soovitada kõige ökonoomsemat katusekonstruktsiooni, mille kontuurirõngas on ellipsikujuline, pikilõige on kumera ja põiklõige nõgusa parabooli kujuline (foto 12).



Joonis 5.  
Hiina Chaoyangi Gümnaasiumi spordihoone katusekonstruktsiooni skeem.



Joonis 6.  
Jaapani olümpiahalli katuse konstruktsiooni skeem.

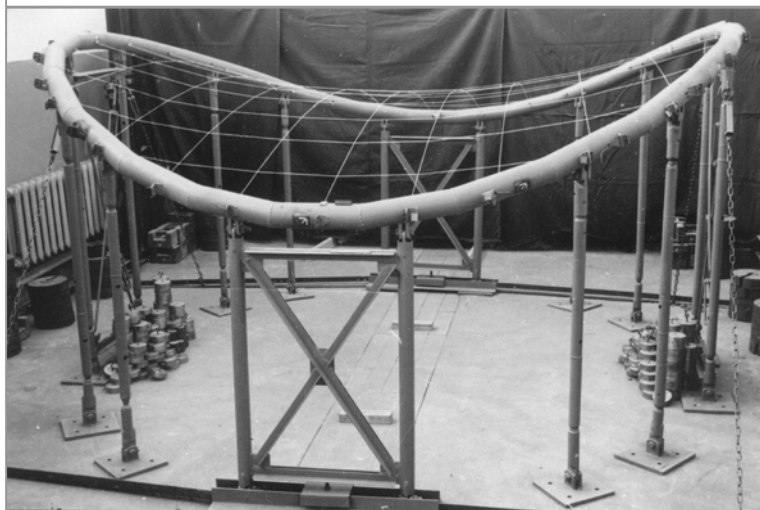


Foto 12.  
Hüperboolse paraboloïdi kujulise rippkatuse võimaliku tüüpkonstruktsiooni mudel.

Sel puhul saab soodsalt ära paigutada keskväljaku areeni ning katuse tõusvate osade alla astmelised tribüünid pealtvaatajatele. Muidugi ei saa välis- tuda ka teisi konstruktiivseid lahendusi – otstar- bekateks võivad kujuneda ühest või kahest sadu- lakujulisest võrgust kolme või nelja toetava kaare- ga katused, ringikujulise kontuuri ja radiaalkaab- litega eelpingestatud süsteem, trapetsikujulise kontuuriga sadulpindade kombinatsioon, aga ka muud võimalused.

## VIITED

- Bangash, M. Y. H. 1999. Suspension and cable- stayed bridges. Prototype bridge structures. Thomas Telford Publ., London.
- Buchholdt, R. 1998. Introduction to cable roof structures. Thomas Telford, London.
- Clark, J. 1999. Triple-jump triumph (The Kuru- shima Kaikyo bridges). Bridge Design and Eng., 15, 27-31.
- Dmitrijev, L. G., Kasilov, A. V. 1968. Cable Roofs. Budivelnik, Kiev, (in Russian).
- Engelbrecht, J. 1971. A nonlinear dynamic analy- sis of hanging structures. Research Conf. 50 years of Building Research Institute of the Technical University of Prague. Prague, 26-32.
- Jorgensen, G.-R., Petersen, A., Pettersson, L. 1999. Hoga Kusten Bridge, Sweden. Struct. Eng. Internat., 9, 106-108.
- Katshurin, V. K. 1962. Theory of Suspension Sys- tems. Strojizdat, Moscow. (in Russian).
- Kollar, L., Szabo, J. 1984. Structural design of cable-suspended roofs. Ellis Horwood, Chichester.
- Kosenko, I. S. 1966. Suspension roof structures. Stroyizdat, Moscow, (in Russian).
- Kulbach, V. 1995. A new hypar-network in Esto- nia. Proc. Nordic Steel Constr. Conf. 95. Stock- holm, 2, 733-740.
- Kulbach, V. 1995. Statical analysis of girder- or cable-stiffened suspended structures. Proc. Eston. Acad. Sci. Eng., 1995, 1, 2-19.
- Kulbach, V. 1999. Half-span loading of cable structures. J. Constr. Steel Res., 49, 167-180.
- Kulbach, V., Idnurm, S., Idnurm, J. 2000. Static analysis of suspension bridges loaded by concent- rated forces. J. Struct. Mech. Helsinki, 34 (2), 3- 14.
- Kulbach, V., Lääne A. 1999. Analysis of sus- pension structures with radial cables. Proc. of 6th Int. Conf. on Modern Building Materials, Struc- tures and Techniques, Vilnius, Technika, 208- 213.
- Kulbach, V, Talvik, I. 2001. Bridge structures for the fixed link Saaremaa. Krokeborg, J. (ed.). Strait Crossings 2001. Balkema, Lisse, 221-226.
- Kuznetsov, E. N. 1969. Introduction to the Theory of Cable Systems. Strojizdat, Moscow, (in Rus- sian).
- Leonard, J. W. 1988. Tension Structures. Behavi- our and Analysis. Mc Graw-Hill, New York.
- Matselinskij, R. N. 1950. Static calculation of fle- xible suspension structures. Gosstroyizdat, Mos- cow, (in Russian).
- Ochendorf, J. A., Billington, D. P. 1999. Self- anchored suspension bridges. J. Bridge Engin., 4, 151-156.
- Otto, F., Schleyer, F. K. 1966. Zugbeanspruchte Konstruktionen. Verlag F. Otto, Berlin.
- Recent Spatial Structures in China. 2006. Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures, Special Issue, 47, 2.
- Saaremaa püsiühendus. Tasuvusuuring. 2000. EV Maanteeameti Tehnokeskus.
- Smirnoff, V. A. 1975. Long-span Suspension Bridges. Vyshaja Škola, Moscow, (in Russian). Special issue on prestressed suspension structures. 2002. Proc. Eston. Acad. Sci. Eng., 8, 2.
- Õiger, K., Talvik, I. 1990. Determination of dy- namic characteristics of saddle-shaped suspension roof. Trans. Tallinn Techn. Univ., 721, 32-37.