



# KIVIKAUDESTA BETONIKAUTEEN

Matti Ollila, tekn.tri, prof.

Artikkeli perustuu professori Matti Ollilan pitämään Suomen Betoniyhdistyksen 80-vuotisjuhlaesitelmään lokakuussa 2005.

## KIVI

Kivi on eräs tärkeimmistä rakennusmateriaaleista. Valtavat tippukiviluolastot, tuulen, veden ja eroosion synnyttämät kivisillat ja -tornit ovat luonnon omia monumenttikohteita. Vastaavasti myös ihminen on aikojen alusta pyrkinyt jättämään itsestään jäljen historiaan. Esimerkkeinä ovat eri kulttuureihin liittyvät kivipyramidit, joita on rakennettu toisistaan tietämättä Egyptissä ja Väli-Amerikassa. Sama koskee Euroopan eri osissa pystytettyjä valtavia kivipatsaita, Menhirejä ja niitä vastaavia Pääsiäissaarten selittämättömiä Aku-Aku -patsaita.

Muista entisaikojen puhtaista kivirakenteista mainittakoon Inkojen Machu Pichu ja roomalaisten rakentamat kiviset akveduktit mm. Segoviassa. Yhteistä näille meidän päiviimme säilyneille rakenteille on erinomaisen tarkasti ilman laastia toisiinsa sovitut kivet.

Vanhoja kauniita kivisilloja on vielä käytössä monissa maissa, myös Suomessa. Tosin eräs kauneimmista, Mostarin silta entisessä Jugoslaviassa tuhouttiin sodassa joitakin vuosia sitten.

Itse Leonardo da Vinci ehdotti 240 metrisen, sykloidin muotoisen kivisillan rakentamista Kultaisen Sarven yli Istanbuliin. Siltaa ei rakennettu, mutta luonnos on myöhemmin todettu teoreettisesti täysin oikeaoppiseksi.

## KIVESTÄ BETONIIN

Kiven jalostettua olomuotoa, betonia, esiintyy n. 2000 vuotta sitten rakennetun Pantheonin läpimitaltaan 45 metrin kupolikatossa. Sen taidokkaasti kevennetty, lakea kohti oheneva kasettirakenne on tehty "Concretum"-massasta, johon on sekoitettu tiiliä. Tämä nykypäiviin säilynyt rakennus on oiva osoitus betonin mahdollisesta elinkaaresta.

Roman valtakunnan jälkeen tieto betonista ja sen käytöstä hävisi syntyäkseen uudelleen vasta 1800-luvulla. Innostus synnytti tällöin erilaisia nerokkaita patenteja rautabetoniin ja jopa jännitettyyn betoniin liittyen.

## NIMET

Insinööri ja urakoitsija *Robert Maillart* on eräs itse oikeutetuista, innovatiivisen suunnittelun kärkinimistä. Hänen tunnetuin kohteensa on 3-nivelkaarena toteutettu Salginatobel-Brücke Sveitsissä, jota syystäkin pidetään eräänä maailman kauneimmista silloista. Se, kuten hänen muutkin kohteensa, edustaa Design-Build-konseptia parhaimmillaan, sillä hän paitsi suunnitteli, myös rakensi nuo sillat.

Italialaisen insinöörin *Pier Luigi Nervi*n Rooman kisoihin suunnittelema Palazzo del Sport, 100 metrin läpimittainen kevennettu betonikupoli, on moderni versio edellä mainitusta Pantheonista.

1 Luonnonmuovaamia maisemaikkunoita, Arches, Utah, 1967.

2 Roomalaisten vuonna 50 jKr rakentama akvedukti Segovissa, Espanjassa.

3 Pantheon, Rooma, Italia, 1740.

1



2



3





4  
Srećihari/The Photo Source

Meksikolainen *Felix Candela* on suunnittelussaan erikoistunut keveisiin kuorirakenteisiin, jotka perustuvat hyperbolisiin paraboloidipintoihin. Niiden etuna on yksinkertainen muottitekniikka ja erittäin pieni ainemenekki suhteessa suuriin jännemitoihin sekä vaikuttava ulkonäkö.

Professori *Fritz Leonhardt*, Betoniyhdistyksen kunniajäsen, oli syvällisesti ja monipuolisesti betonirakenteiden suunnittelua ja sen perusteita analysoinut henkilö, jonka referenssit ulottuvat erilaisista siltarakenteista korkeisiin TV-torneihin. Samanlaisia rakennesuunnittelun vaikuttajia ovat olleet *Eduardo Torroja*, *Ove Arup* ja monet muut.

Tämän päivän ykkösnimenä voidaan pitää *Santiago Calatravaa*, joka koulutukseltaan on sekä arkkitehti, insinööri että kuvanveistäjä. Hänen suunnittelukohteilleen on ominaista veistoksellinen ulkonäkö ja usein ensi näkemältä arvoituksellinen rakenteellinen toimintaperiaate.

Suomalaisista betonirakenteiden suunnittelijoista tunnetuimpina erottuvat *Paavo Simula*, *Erkki Juva* ja *Magnus Malmberg*. Innovatiivisista rakentajista *Matti Janhunen* poikineen on erityismaininnan arvoinen. Hänen aloitteellisuutensa ja idearikautensa kehitti rakennustekniikkaamme enemmän kuin erilaiset kehitysohjelmat yhteensä. MJ-palkki, elementtirakenteiset MJ-vesitornit, betonielementtisillat, Palacen laatuaan ensimmäinen elementtijulkisivu jne ovat esimerkkejä heidän ideoistaan ja aikaansaannoksistaan.

Rakennusala maassamme tarvitsee juuri tällaisia "matti janhusia" kehittyäkseen ja pysyäkseen kilpailukykyisenä.

### MUOTO, MATERIAALI JA MITTASUHTEET

Olen kuriositeettina selvittänyt muodon ja muotoilun merkitystä erilaisten betonirakenteiden rajamittoihin, kun kuormituksena on vain rakenteen omapaino. Betonin lujuudeksi on otaksuttu K80 ( $f_c = 30$  MPa) ja tilavuuspainoksi  $0,025$  MN/m<sup>3</sup>. Betonin ominaispituudeksi voidaan määrittellä  $L_c = f_c / \gamma_c = 1200$  m.

Tämä on sama kuin alapäästä kiinnitetyn tasapaksun, *putkimaisen tornin* rajakorkeus mikäli putken läpimitta on yli 50 m (nurjhdusehto).

Mainittakoon, että prof. Leonhardt ehdotti aikanaan Saharaan rakennettavaksi 1000 metrin korkuisen putken, jonka pystyvirtaukset toimisivat voimanlähteenä. Kaukana em. rajamitasta ei ole



5

4  
Entisessä Jugoslaviassa, Neretva-joen ylittävä Mostarin silta valmistui v. 1566. Silta on tuhoutunut.

5  
Gizan pyramidi Egyptissä.







6



7



6

Robert Maillartin 1929-1930 suunnittelema ja rakentama 3-nivelkaarena toteutettu Salginatobelin silta Sveitsissä.

7

Eero Saarisen kaarimonumentti, St. Louis, Yhdysvallat, 1964.

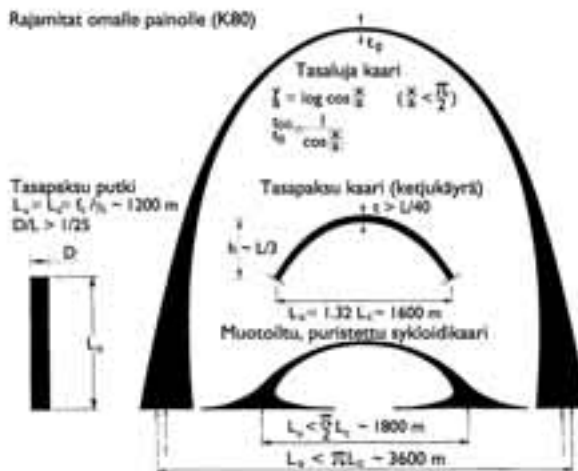
8

Tikkurilan vesitorni, Matti Janhunen, Insinööritoimisto Oy Matti Ollila & Co, 1975.

9

Tasapaksun, ketjukäyrän muotoisen betonikaaren rajamitat omalle painolle. Matti Ollila, 2005.

Rajamitat omalle painolle (K80)



9

myöskään Abu Dhabiin suunniteltu 800 metrin koruinen rakennus.

Tasapaksu, ketjukäyrän muotoinen betoni-kaari voi enimmillään saavuttaa jännemitan  $L_u \sim 1,3L_c \sim 1600 \text{ m}$ . Tällöin kaaren lakikorkeuden tulee olla  $n \sim 1/3$  ja kaaren paksuuden  $> 1/40$  jännemitalta. Sandön sillan kaari Ruotsissa, jännemitaltaan 300 m, on muodeltaan likimain tämän kaltaisen.

Sykloidin muotoisen, poikkileikkaukseltaan muuttuvan, puristetun betonikaaren rajajännemitta on edellistä suurempi

$$L_u < \frac{\pi}{2} L_c = 1800 \text{ m}.$$

Juuri tämän muotoisen oli da Vincin kaavailema Kultaisen Sarven silta.

Suurin mahdollinen jännemitta saavutetaan tasalujalla puristetulla kaarirakenteella. Sille kehittämäni matemaattinen muoto on seuraava

$$y = a \log \cos \left| \frac{x}{a} \right| ; \left| \frac{x}{a} \right| < \frac{\pi}{2}$$

ja kaaren paksuuden määrittelevä yhtälö

$$\frac{t(x)}{t(0)} = \frac{1}{\cos \left| \frac{x}{a} \right|}$$

Tällaisen kaaren rajapituus  $L_u < \pi L_c$ . Mikäli kaaren korkeus ja jännemitta valitaan samaksi, on vastaava rajajänne  $L_u \sim 3 L_c = 3600 \text{ m}$ . Eero Saarisen suunnittelema St.Louisin kaupungin yli 100 metrin korkuinen kaarimonumentti on muodeltaan ja muotoilultaan likimain tätä teoreettista ihannemallia vastaava.

Vedetyin, päästään ankkuroidun tasapaksun Spannband-rakenteen rajajännemitta

$L_u \sim 0,2 L_c \sim 240 \text{ m}$ . Sen venymästä johtuva kaarevuus vastaa tällöin keskikohdan taipumaa  $\delta \sim L/40$ .

Tällaisia, jännemitaltaan jopa 100 metrin mittaisia siroja jalankulkusiltoja on toteutettu mm. Sveitsissä ja USA:ssa.

Taivutetuissa, tasapaksuissa palkki- ja laattarakenteissa rajajännemittat määräytyvät joko taipuman tai jännitysten perusteella. Rakenteellista jatkuvuutta hyväksikäyttäen tuo rajamitta kasvaa noin



Maritta Kouvisto



10

Paolo Rossetti



11

Fritz Leonhardt



12

10  
Santiago Calatravan suunnittelema taide- ja tiedekeskus Ciudad de las Artes y Ciencias, Valencia, Espanja, 2000 - 2005.

11  
Santiago Calatravan suunnittelema Alamillo bridge, Sevilla, Espanja, 1989-1992.

12  
Sydney Harbour Bridge, Sydney, Australia.



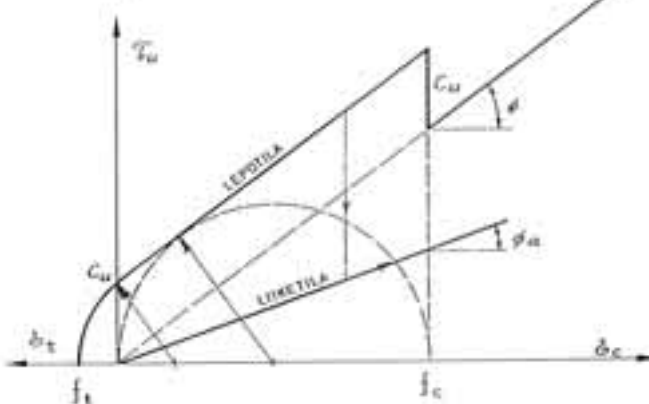


Hans-Peter Merten



Insinööritoimisto Matti Ollila & Co Oy

## Betonin lujuusteoria



15

30 % vapaasti tuettuun rakenteeseen verrattuna.  
14 Vaihtoehtoisesti voidaan palkin korkeutta madaltaa tai sen kuormitusta lisätä.

### RAKENTEET JA YMPÄRISTÖ

Rakenteiden vaikutusta kaupunkikuvaan ei ole syytä aliarvioida. Ajateltakoon vaikkapa lukemattomia toinen toistaan kauniimpia siltoja Pariisissa, Prahassa tai Budapestissa, Sydneyn Harbour Bridgen ja Oopperatalon muodostamaa kokonaisuutta, Toronton CN-tornia jne. Vastaavia esimerkkejä löytyy meiltäkin; Tammerkosken patsain koristeltu silta, Turun Myllysilta, josta itse olen ylpeä, Porvoon uusi Aleksanterinkadun silta, jossa arkkitehdin muotoilema, tavanomaisesta poikkeava sillan alapinta on olennainen sen ulkonäköön vaikuttava tekijä.

Pienemmistä rakenteista mainittakoon jalankulkutunnelit, jotka voivat olla huonosti valaistuja, töhrittyjä ihmisviemäreitä tai samanhintaisia, hyvin suunniteltuja, siistejä vinoseinäisiä tai kaarevia kehä.

Vaativaan luonnonmaisemaan suunniteltu rakenne, esim. silta, ottaa parhaimmillaan ympäristön huomioon sopeutumalla siihen muodoltaan ja materiaaliltaan. Pahimmillaan se voi pilata ympäristön monien kilometrien säteellä. Molemmista on esimerkkejä meillä ja muualla. Positiivisina esimerkeinä voidaan mainita Ganter Brücke sveitsiläisessä alppimaisemassa sekä Ranskan ja Espanjan rajalla sijaitseva Le Viaducte Millaun:n silta yli 300 m korkuisine pyloneineen.

### SUOMEN RAKENNUSTEKNIIKAN TILA

Rakentaminen Suomessa on muuttunut suunnittelijavetoisesta tuottajavetoiseksi. Tuotanto ja suunnittelu on samalla pyritty standardisoimaan joustamattomalle DDR-tasolle, josta entiset sosialistimaat ovat ja vieraantuneet. Yksinkertaisuus on priorisoitu ko. prosessissa. Yksinkertaiset suunnittelijat, suunnittelevat tai lähinnä valitsevat, yksinkertaisia, vapaasti yksinkertaisiin leukapalkkeihin tuettuja ontelolaattoja. Palkit puolestaan ovat vapaasti tuettuja rumiin oksapilareihin. Rakennetta voidaan verrata autoon, josta yksinkertaisuuden vuoksi on jätetty jouset ja iskuvaimentimet pois.

Tämäntapaiset teräs-, betoni- tai puurakenteiset korttitalot, joista puuttuu täysin rakenteellisen jatkuvuuden aikaansaama sitkeys ja energianvaimennuskyky, ovat olennainen rakennusten turvallisuusriski. Tämä riski on konkretisoitunut lukemattomissa

sa viimeaikojen rakennussortumissa, joita Suomessa on tapahtunut suhteellisesti eniten koko EU:n alueella.

Turvallisuuden parantamiseksi on tehty monikymmensivuisia ohjeistoja organisaatiokaavioineen ja ehdotettu samantapaista, kustannuksia lisäävää, vastuutaottamatonta Prüfung-menettelyä kuin Saksassa.

Nopeimmin vaikuttava, kutakuinkin kustannusneutraali ohje rakenteellisen jatkuvuuden edellyttämisestä, on kuitenkin "pyhän yksinkertaisuuden" nimissä jätetty tekemättä.

### RAKENNUSTEKNIIKAN KEHITYSMAHDOLLISUUDET

Teollinen, laadukas rakentamistekniikka tulee meillä säilyttämään vahvan asemansa tulevaisuudessa. Se edellyttää kuitenkin asennemuutosta koko prosessissa. Yleinen pyrkimys luonnonvarojen käytön optimaaliseen hyötysuhteeseen merkitsee keveiden, moniaukkoisten, jatkuviin kerrospilareihin tuettujen liittorakenteiden palkkien käyttöä. Palkkeihin tuetut ontelo- tai jännelaatat saadaan jatkuviksi raudoitettujen, ohuen pintalaatan avulla, joka sitoo rakenneosat monoliittiseksi kokonaisuudeksi rakenteellisen turvallisuuden edellyttämällä tavalla.

Tämän välttämättömän muutoksen kustannusvaikutuksia analysoitaessa on otettava huomioon pienempi materiaalimenekki, tarvittavan nostokaluksen pienempi koko, suuremmat jännematat tai pienempi rakennekorkeus, yksinkertaisemmat rakenneosat, joiden lukumäärä on lähinnä sama jne. Vertailuissa hinta ja hinnoittelu saattavat ennakkoluuloista johtuen poiketa paljonkin toisistaan.

### RAKENNESUUNNITTELUN KEHITYSNÄKYMÄT

Suunnittelua ohjeistavat lukemattomat laajat, EU:n myötävaikutuksella jatkuvasti muuttuvat normit ovat, niiden hyödyllisyyttä mitenkään kiistävä, eräs kehityksen jarru, kuten professori Ralf Lindberg on ansiokkaasti todennut.

Betoninormit, jotka käsittelevät lähinnä suora-kaiteen muotoisia umpiprofiileja, ovat luonteeltaan empiirisiin kokeisiin perustuvia ohjeita, ilman teoreettisia perusteluja.

Tämän puutteen olen omalta osaltani korjannut geotekniseen leikkausmurtoteoriaan perustuvan "Concrete Strength Theory" avulla, jossa kiinteäksi

13

Christian Mennin, W. Maagin, H. Rigendingerin suunnittelema Ganter-silta Simplon Pass road Christian Menn, 1976-1980.

14

M-palkki, Matti Ollila, Insinööritoimisto Matti Ollila Oy & Co Oy, 2003.

15

Betonin lujuusteoria, Matti Ollila, Insinööritoimisto Matti Ollila & Co Oy, 2005.

16

Le Viaducte Millaun silta.

17

Aleksanterinkadun silta, Porvoo, 2004.

18

Oksapilari-palkisto, Insinööritoimisto Oy Matti Ollila & Co, 2005.





Daniel Jammme



16 Jussi Törnänen

maalajiksi otaksutun betonin sisäinen kitkakulma ja koheesio määräytyvät sen puristus- ja veto-murto-  
lujuuden perusteella. Teoriaa hyväksikäyttäen pää-  
dytään normien mukaisiin kapasiteettiarvoihin eri  
leikkaussuureiden osalta. Lisäksi se antaa vastauk-  
sen moniin normien avulla selvittämättömiin ongel-  
miin, esim. ontelolaattojen huomattavasti normiar-  
voja suurempaan leikkauskapasiteettiin.

Mielestäni teoreettinen näkemys on analyttisen  
suunnittelun peruslähtökohta, normien ollessa vain  
suunnittelua helpottava ohjeisto.

#### FROM STONE AGE TO CONCRETE AGE

(the article is based on the lecture prepared for the 80th An-  
niversary of the Concrete Association of Finland given by  
Professor Matti Ollila.)

After the Roman Empire, the knowledge of concrete and  
its use vanished, and did not reappear until in the 19th centu-  
ry. The enthusiasm it created at the time produced various in-  
genious patents connected with iron concrete and prestres-  
sed concrete.

Acknowledged names in the field of concrete construction  
include e.g. Robert Maillart, an engineer and contractor, Pier  
Luigi Nervi, an Italian engineer, and Felix Candela from Mexi-  
co. Professor Fritz Leonhardt conducted thorough and versati-  
le analyses on the design of concrete structures and the  
grounds of design, and became an honorary member of the  
Concrete Association of Finland. Structural design has also  
been influenced by Eduardo Torroja, Ove Arup etc.

The best-known name today is probably Santiago Calatra-  
va, who is an architect, an engineer and also a sculptor. The  
foremost Finnish names in the design of concrete structures  
include Paavo Simula, Erkki Juva and Magnus Malmberg whi-  
le Matti Janhunen and his sons are acknowledged innovated  
constructors

Even today, the influence of the structures on the townsca-  
pe should be taken into consideration in construction projects.  
Structures, such as bridges, designed in demanding natural  
settings adapt to the environment in terms of both forms and  
materials, when implemented in the best possible manner.

In Finland, building has transformed from a designer-ori-  
ented into a producer-oriented process. At the same time, ef-  
forts have been focused on standardising both production and  
design, sometimes excessively. High-quality industrial  
construction technology will retain its strong position in Fin-  
land also in the future. However, this requires an attitude  
change in the entire process. When cost effects are analysed,  
the lower demand for materials, the smaller size of the requi-  
red lifting gear, the larger spans or the smaller structural  
height and less complicated structural parts should be taken  
into consideration. Contrary to pre-expectations, the price  
and the pricing may differ extensively in the comparison.

The numerous norms, constantly changed due to EU requi-  
rements, which direct the design process also slow down de-  
velopment, even if their usefulness cannot be disputed. In my  
opinion, a theoretical view is the basic starting point of analy-  
tical design, and norms are just tools for the design process.



18 Mikka Konttila

