

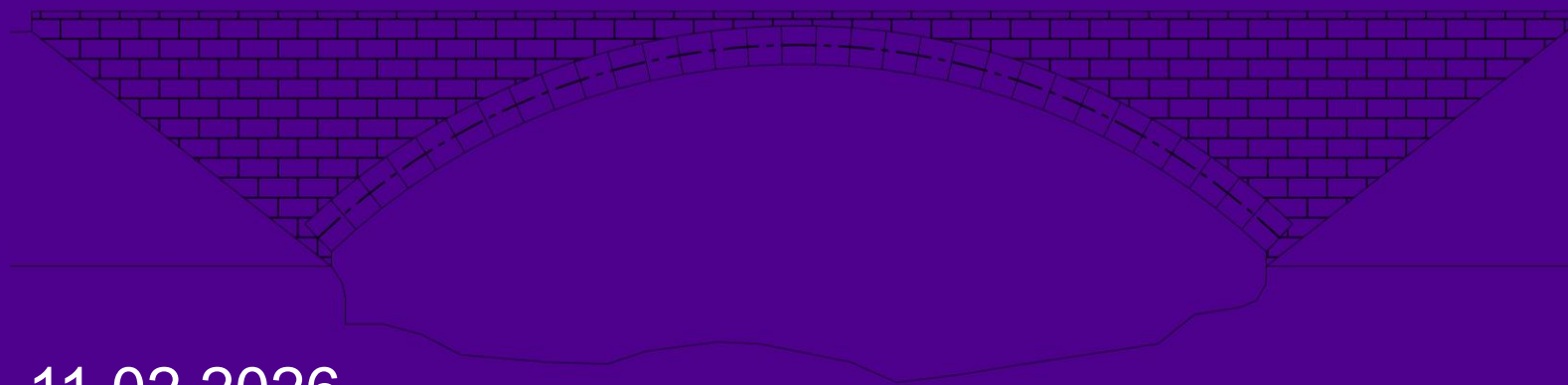
Kiviset holvisillat

Luonnonkivirakenteiden erityispiirteet, rakenteellinen toiminta, analysointi ja kantavuus

Diplomityö

Tuomas Nieminen

Siltatekniikan päivät 10. – 11.02.2026



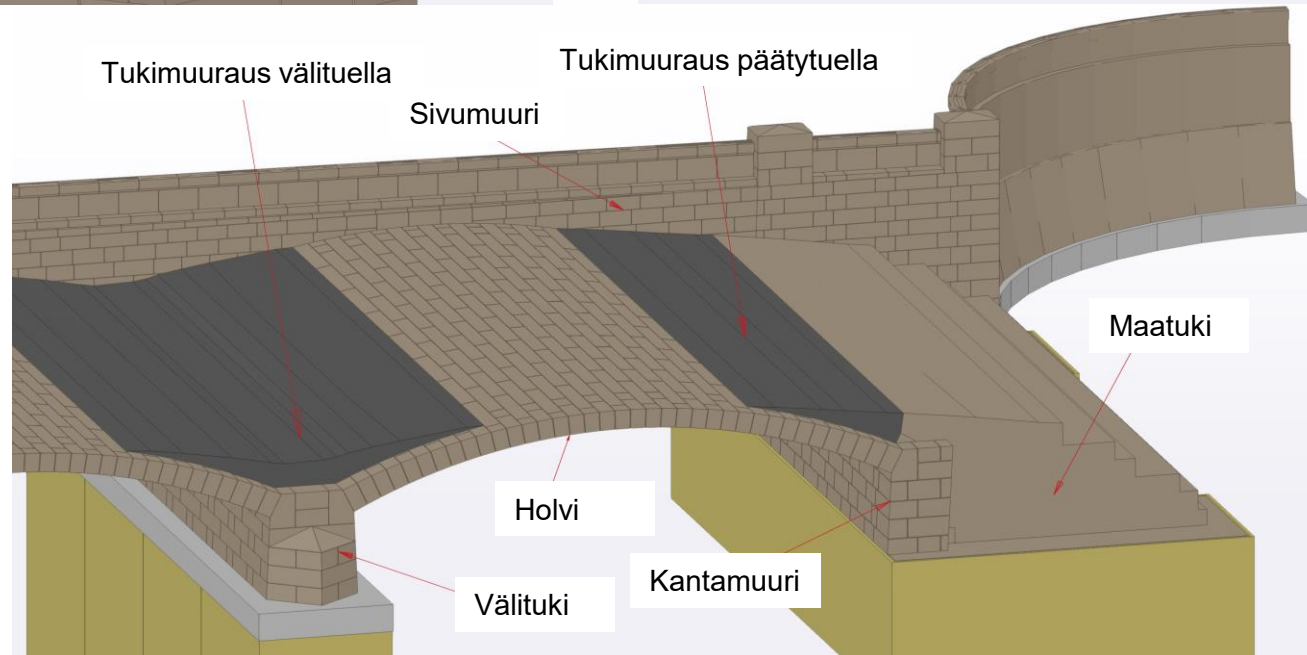
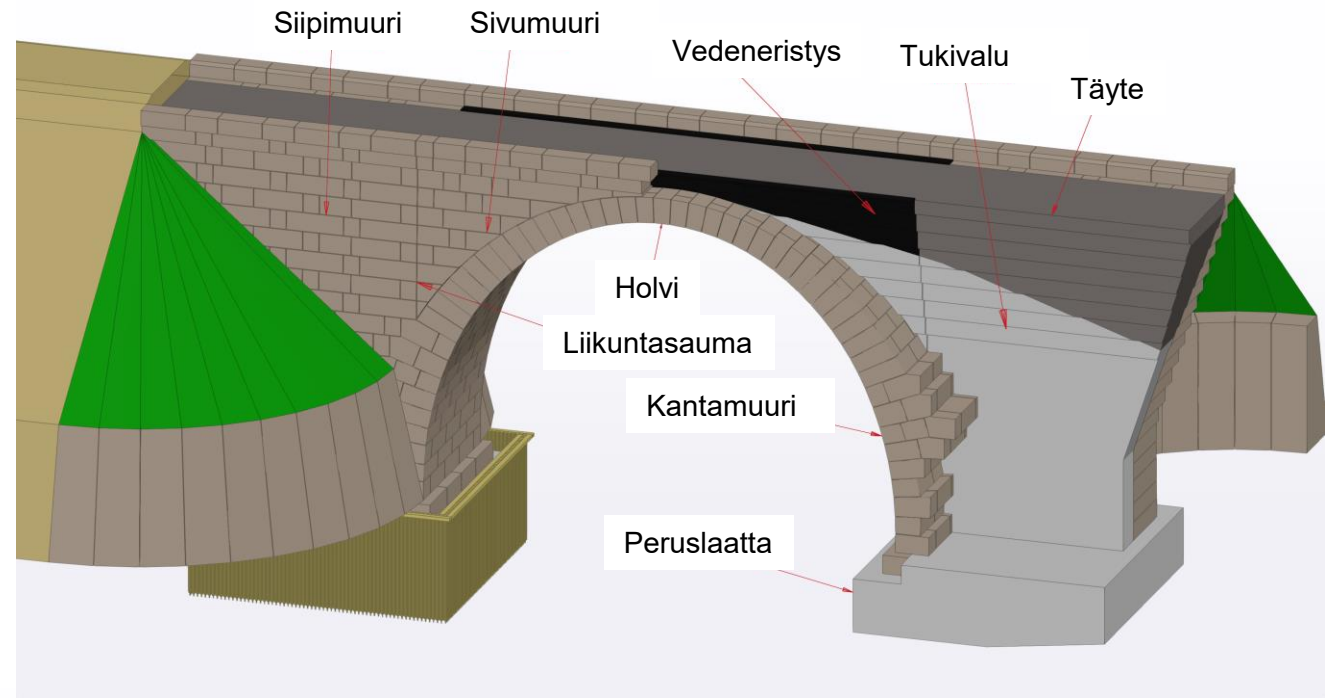
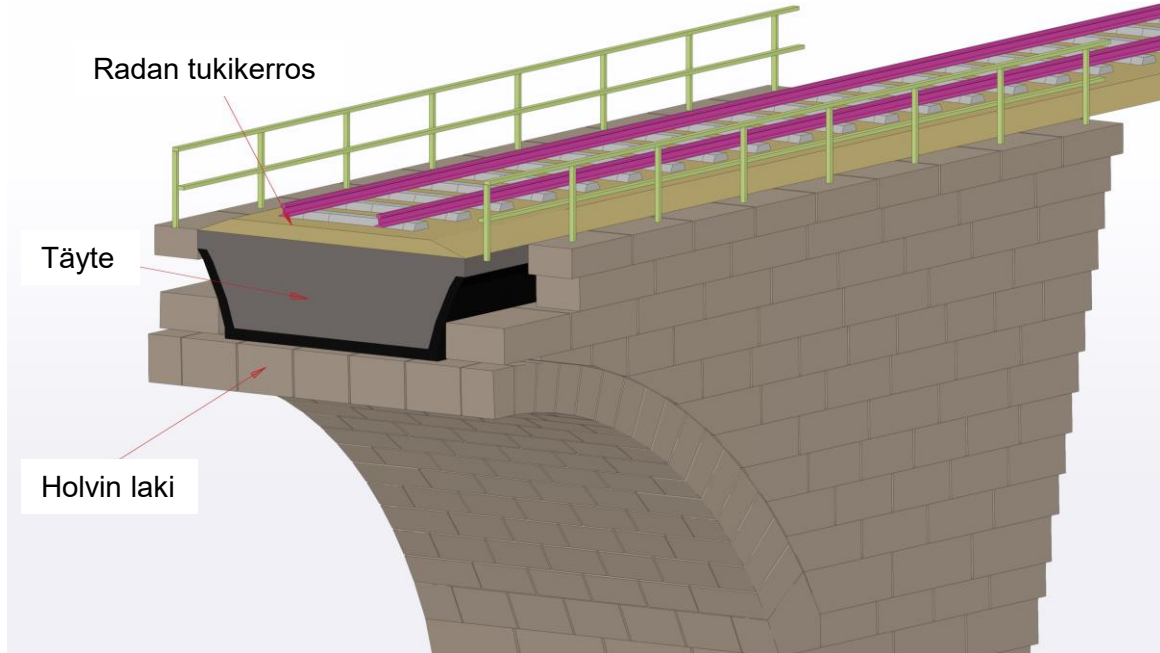
Diplomityön tavoitteet ja sisältö

- Tavoitteena oli
 - tutkia kivisten holvisiltojen rakenteellista toimintaa ja kantavuutta
 - selvittää siltöjen kantavuuden arvioinnissa käytettäviä menetelmiä ja ohjeita
- Työn sisältö
 - Katsaus muuratun kaaren analysoinnin historiaan, kaaren muotoihin sekä muurattujen rakenteiden materiaaliominaisuuksiin
 - Muurattujen holvisiltojen rakenneosat ja niiden yhteistoiminta
 - Uusimmat eurooppalaiset muurattujen holvisiltojen kantavuuslaskentaohjeet ja niiden kehitys
 - Laskennalliset tarkastelut kaksiulotteisella rakennemallilla, 1-aukkoiset tiesillat
- Työn alkuvaiheessa tehtiin viisi vapaamuotoista haastattelua
- Työn aikana tutustuin myös lukuisiin siltoihin eri maakunnissa
- Diplomityön ohjaus ja tarkastaminen: Tampereen yliopisto ja Väylävirasto

Taustaa

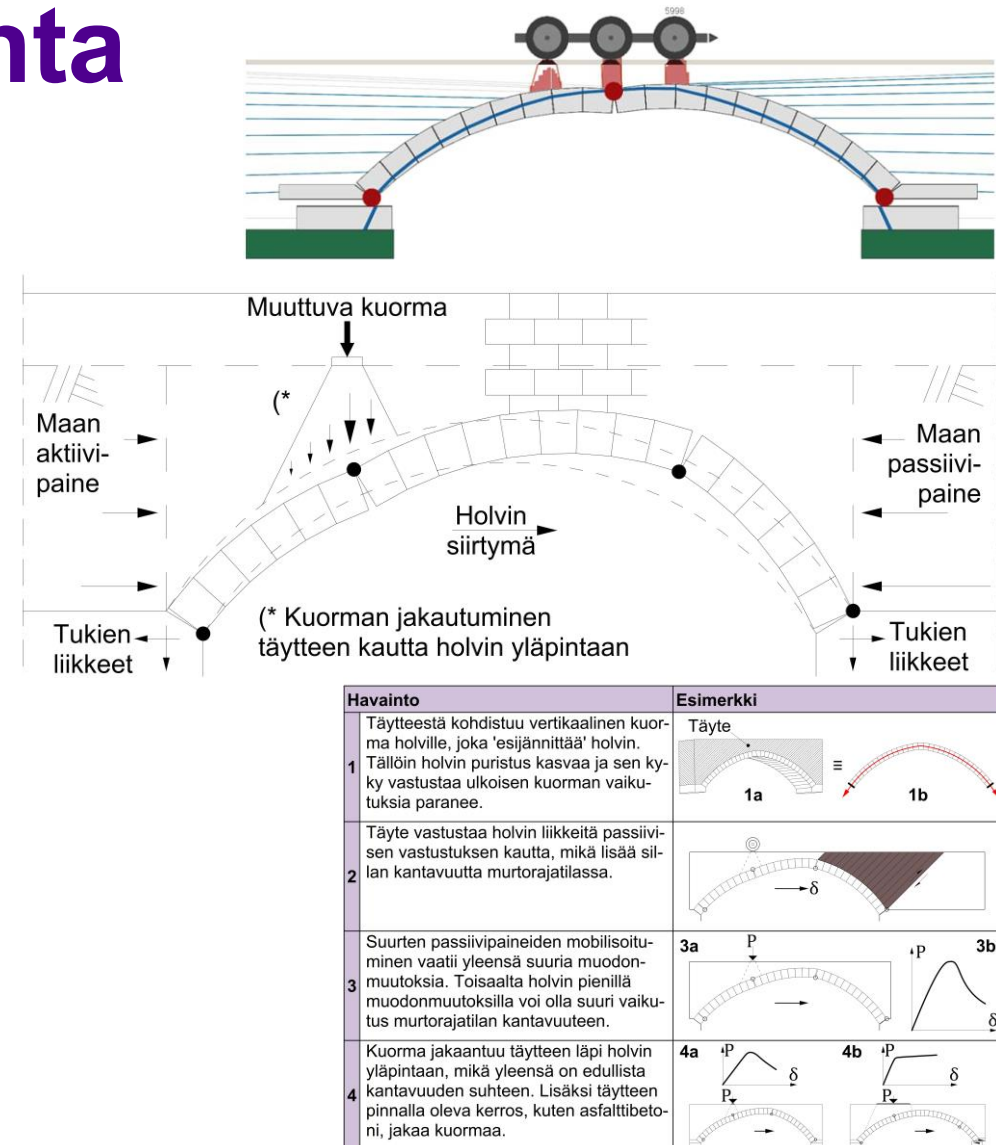
- Kiviset holvisillat ovat muurattuja rakenteita → muuratut holvisillat*
- Tutkimusaiheena ajankohtainen Euroopassa
 - mm. Britanniassa sekä Keski- ja Etelä-Euroopassa on yhä jatkuvassa käytössä suuri määrä yli 50–100 v vanhoja siltoja
 - Nykyisten raskaiden ja luonteeltaan toistuvien kuormien on havaittu heikentävän ikääntyvien siltojen kantavuutta
 - Yleisesti hyväksyttyjä menetelmiä kantavuuden arviointiin ei toistaiseksi ole kehitetty
 - Uuden tutkimuksen avulla ohjeistusta on kuitenkin pystytty päivittämään merkittävästi
- Suomessa ongelmana erityisesti siltojen alusrakenteiden kunto ja tukien painumat
 - Vauriot liittyvät pitkälti tiesiltoihin, vakavia vaurioita vähemmän rautatiesilloissa
 - Päällysrakenteen vaurioita ovat mm. kivien siirtymät ja holvin vääristyminen tai ”löystyminen”
 - Suomessa kivistiltojen osuus kaikista silloista on vähäinen
 - Väyläviraston *Siltojen kantavuuslaskentaohje* ei sisällä tarkkoja ohjeita kivistä rakennetuille silloille
- Nykyisten laskentamenetelmien kehitykseen on vaikuttanut mm. Jacques Heymanin v. 1966 julkaistu artikkeli *The Stone Skeleton* [1]
- Suomessa kantavia luonnonkivirakenteita on tutkittu TTKK:ssa 1970–1990-lukujen aikana

Sillan rakenneosat



Sillan rakenteellinen toiminta

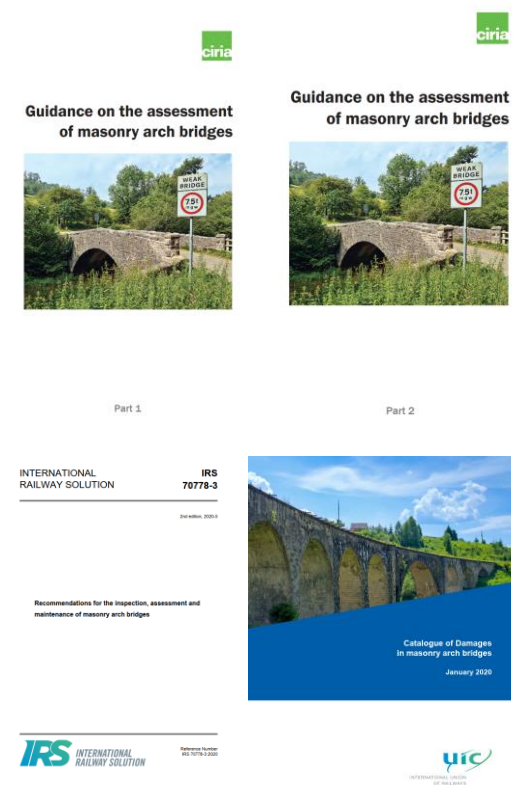
- Rakenteen muodolla on keskeinen vaikutus sillan toimintaan. Muurattu rakenne toimii puristettuna
- Normaalijännitykset jäävät yleensä pieniksi suhteessa materiaalin lujuuteen
- Täytteen toiminta on olennainen osa sillan toimintaa
 - Täyte jakaa kuormaa ja vastustaa holvin liikkeitä
 - Täytekerroksen paksuuden kasvattaminen lisää holvin puristusta, nk. passiivinen vastustus on seurausta maan leikkauslujuudesta
- Holvin saumojen vetolujuus on yleensä hyvin pieni tai sitä ei ole lainkaan. Muurauskappaleilla sen sijaan on vetolujuutta
- Tukien jousto sekä pienet muodonmuutokset ulkoisen kuorman alla aiheuttavat saumojen avautumista/halkeilua.
- Tavanomainen silta voi muuntua sortuessaan mekanismiksi, esimerkiksi 1-aukkoinen silta 4-nivelmekanismiksi. Muurauskappaleet voivat myös liukua kontaktipintojensa suhteen



Kantavuuslaskentaohjeet

- CIRIA C656 (2006) ja CIRIA C800 (2022)
 - Tarjoaa lisäohjeistusta Ison-Britannian DMRB* CS 454 -ohjetta soveltaville tahoille
 - C656 sisältää laajasti tietoa mm. rakennustavoista ja -materiaaleista
 - C800 sisältää päivitettyjä ohjeita rakenneanalyysiin, soveltaa eurokoodeja sekä esittää esimerkkilaskelmia
 - Lisäksi C800 sisältää kattavasti tietoa ohjeen kehitysvaiheessa tehdystä tutkimuksesta
 - Soveltuu sekä tie- että rautatiesilloille
- UIC (muuratut holvisillat rautateillä)**
 - IRS 70778-3
 - Ohjeiden taustalla 2000-luvun alussa käynnistynyt laaja tutkimus- ja kehitystyö
 - *Catalogue of Damages in masonry arch bridges* havainnollistaa laajasti siltojen vaurioita ja vauriomekanismeja
- Ohjeet suosittelevat laskennan palastelua tarkkuustasoihin
 - Hyvin tarkat laskentamallit vaativat enemmän resursseja sekä laskenta-aikaa
 - Alemmilla tarkkuustasoilla kuormien vaikutuksia voidaan suurentaa ylimääräisellä kertoimella

* Design Manual for Roads and Bridges DMRB, ** Kansainvälinen rautatieliitto UIC, International Railway Solution IRS



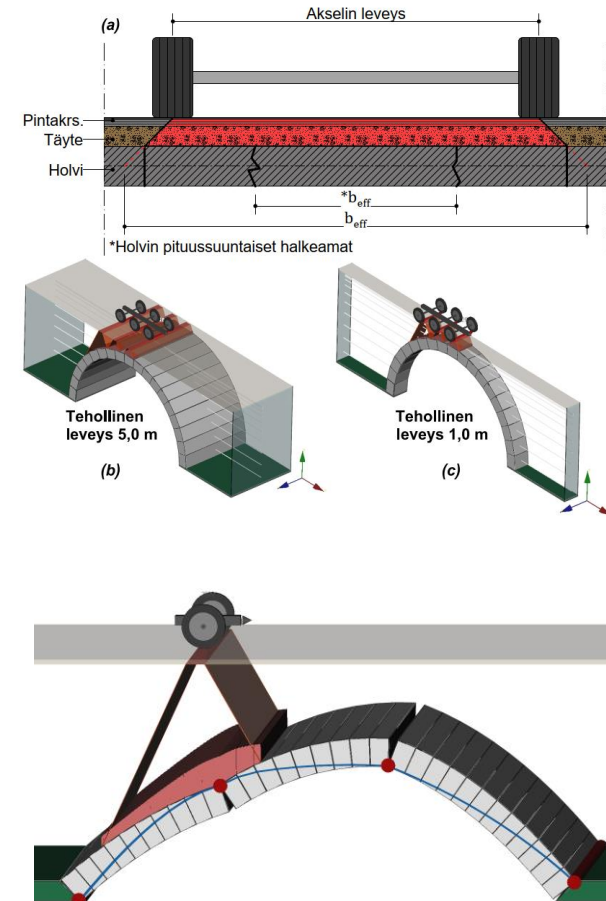
Taso	Tarkkuus	Geometria	Materiaalit	Kuormat	Laskentatyökalut
0 ¹	Hyvin yksinkertaistettu	Arvioitu	Ohjeiden mukaiset	Ohjeiden mukaiset	-
1	Yksinkertaistettu, riittävän konservatiivinen	Mitattu (päämitat)	Ohjeiden mukaiset	Ohjeiden mukaiset, muutokset otettu huomioon	Yleensä globaali 2D-analyysi
2	Tarkka	Mitattu	Ohjeiden mukaiset / Testattu ²	Nykyiset ja tulevat (todelliset)	Yleensä globaali 2D-analyysi tai yksink. 3D-analyysi, lokaalit vaikutukset voidaan ottaa huomioon
3	Hyvin tarkka, todenmukainen	Mitattu	Testattu ²	Nykyiset ja tulevat (todelliset)	3D-analyysi, mahdollisimman todenmukainen

¹ Käytetty joskus huonokuntoisimpien siltojen priorisointiin (Britanniassa). Ei välttämättä ole ajallisesti sen tehokkaampi kuin taso 1.

² Tarpeen vaatiessa voidaan käyttää muista samankaltaisista silloista kerättyä tietoa.

Rakenneanalyysi

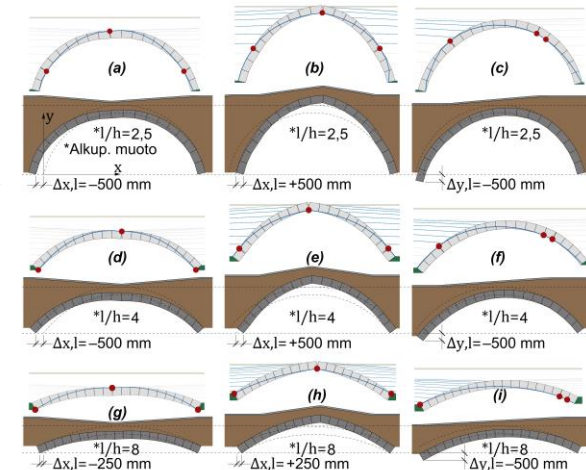
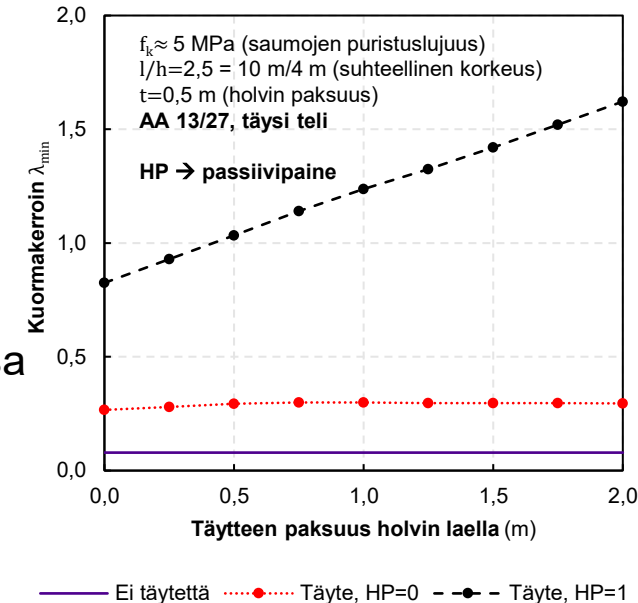
- Kaaren puristusviivan tutkiminen on yleinen tapa arvioida sillan kantavuutta
 - Muurattu kaari on lähtökohtaisesti staattisesti määräämätön rakenne. Kaari saa staattisesti määrätyn muodon, kun muurauskappaleiden saumat avautuvat ja syntyy "niveliä" → tasapainoehdot voidaan lausua 3-nivelkaarelle
 - "Perussäännön" mukaan, mikäli puristusviiva / -vyöhyke säilyy holvin sisällä eikä sen kulma kappaleiden saumoissa ylitä saumojen kitkakulmaa, rakenne on stabiili
 - Puristusviivamenetelmän avulla sillan kantavuudesta saadaan holvin muodosta riippuen joko konservatiivinen tai epäkonservatiivinen arvio [2]
- Työssä syvennyttiin **plastiseen rajakuormamenetelmään*** käsin laskemalla sekä LimitState: RING 4.0 -ohjelmalla [3]
 - Tuloksena saadaan ulkoisen kuorman kuormakerroin sillan sortumishetkellä (murtorajatilassa MRT), jolloin silta muuntuu mekanismiksi ja puristusviiva kulkee "plastisten nivelten" läpi tai/sekä kivi-kappaleet liukuvat
 - Ohjelmassa voidaan myös tutkia sillan tukien painumista sekä suorittaa PLS-analyysi**
- RING 4.0 -ohjelmalla täytteessä mobilisoituvia passiivi- ja aktiivipaineita voidaan mallintaa epäsuorasti täyte-elementeillä
 - Klassisen maanpaineteorian soveltaminen kaarevalle holville vaatii empiiristen modifiointikertoimien käyttöä: maanpaine kerrointa K redusoidaan/kasvatetaan



* engl. (Plastic) Limit Analysis Methods, ** Käyttörajatilaan rinnastettava Permissible Limit State

Havaintoja

- RING 4.0-ohjelmalla laskenta on kohtuullisen tehokasta, mutta vaatii suunnittelijalta siltatyypin perehtymistä, sillä laskentaparametreja on paljon
 - Koska sillan maataytteellä on merkittävä vaikutus kantavuuteen, todellisessa kohteessa maan ominaisuudet on syytä selvittää tarkasti
 - Ohjelman käyttämä rajakuormamenetelmä soveltuu parhaiten geometrialtaan tavanomaisiin siltoihin joissa liikennekuormat ovat suuria suhteessa sillan omaan painoon. Holvin toimiva leveys vaikuttaa sillan painoon ja edelleen kuormakertoimeen
 - Kuormakaaviolla on vaikutusta sortumismekanismiin
 - Sillan geometrialla on suuri vaikutus kriittisen kuorman sijaintiin
- Saumaamattomissa holveissa laastia ei ole, mikä tekee saumojen puristuslujuuden arvioinnista haastavaa. Lisäksi graniitin lujuus on liian suuri eurokoodille 6 (SFS-EN 1996) → arvoja sekä kaavoja on etsittävä muista lähteistä
 - Puhdas kiven murtuminen on hyvin monimutkainen ilmiö, kuten on myös paksuilla laastisaumoilla muuratun tiili- tai kivimuurin
- RING 4.0:n tukipainuma-analyysin avulla holvin muotoa voidaan vääristää ja vääristynyt muoto syöttää uudelleen ohjelmaan. Vääristyneellekin muodolle jouduttiin kuitenkin otaksumaan jäykkä tuenta, mikä ei täysin vastaa todellisuutta



Jatkotutkimus ja tulosten hyödyntäminen

- Suomessa kivisiltoja pyritään säilyttämään ja uusiakin siltoja saatetaan vielä suunnitella
 - Onko tarvetta kehittää uutta ohjeistusta, joka käsittelee myös kivisiä holvisiltoja?
- Muuratut holvisillat sortuvat harvoin liiallisen kuorman alla
 - Käyttörajatilaa (KRT) ei voida suoraan soveltaa muuratuille rakenteille, joille mm. halkeilu on luonteenomaista
 - Yhä käytössä olevien siltojen kantavuuslaskennan tueksi on kehitetty *Permissible Limit State* (PLS, vrt. KRT). Rakenteen vaurioitumisen on havaittu kiihtyvän, mikäli normaalien kuormien vaikuttaessa tämä rajatila ylitetään.
- 2D-laskentamalleja yksityiskohtaisemmat mallit
 - Sillan toiminta on todellisuudessa voimakkaasti kolmiulotteista. 2D-laskentaan voi liittyä huomattavia epävarmuuksia
 - Suurten ja yksityiskohtaisten laskentamallien luominen sekä tulosten tulkinta edellyttää siltatyyppiin liittyvien perusilmiöiden tuntemista
 - mm. rautatiesilloissa on yleensä hyvin massiiviset sivu- ja siipimuurit, jotka täytteen ohella tukevat holvia vaakasuunnassa. Miten tällainen silta todellisuudessa menettää kantavuutensa?



Kiitos!

Diplomityö löytyy
osoitteesta:

[https://urn.fi/URN:NBN:fi:tu
ni-202504143695](https://urn.fi/URN:NBN:fi:tu
ni-202504143695)

Lähteet:

[1] Heyman, J. (1966). "The stone skeleton". International Journal of Solids and Structures 2.2, s. 249–279. DOI: [https://doi.org/10.1016/0020-7683\(66\)90016-7](https://doi.org/10.1016/0020-7683(66)90016-7)

[2] Nanayakkara, K. Isuru U., Liew, A. & Gilbert, M. (2025). Thrust layouts in masonry gravity structures. International Journal of Solids and Structures. DOI <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2025.113593>

[3] LimitState Ltd (2024). LimitState:RING. URL: <https://www.limitstate.com/ring-documentation>

