

Ehitusvea kaart nr 15

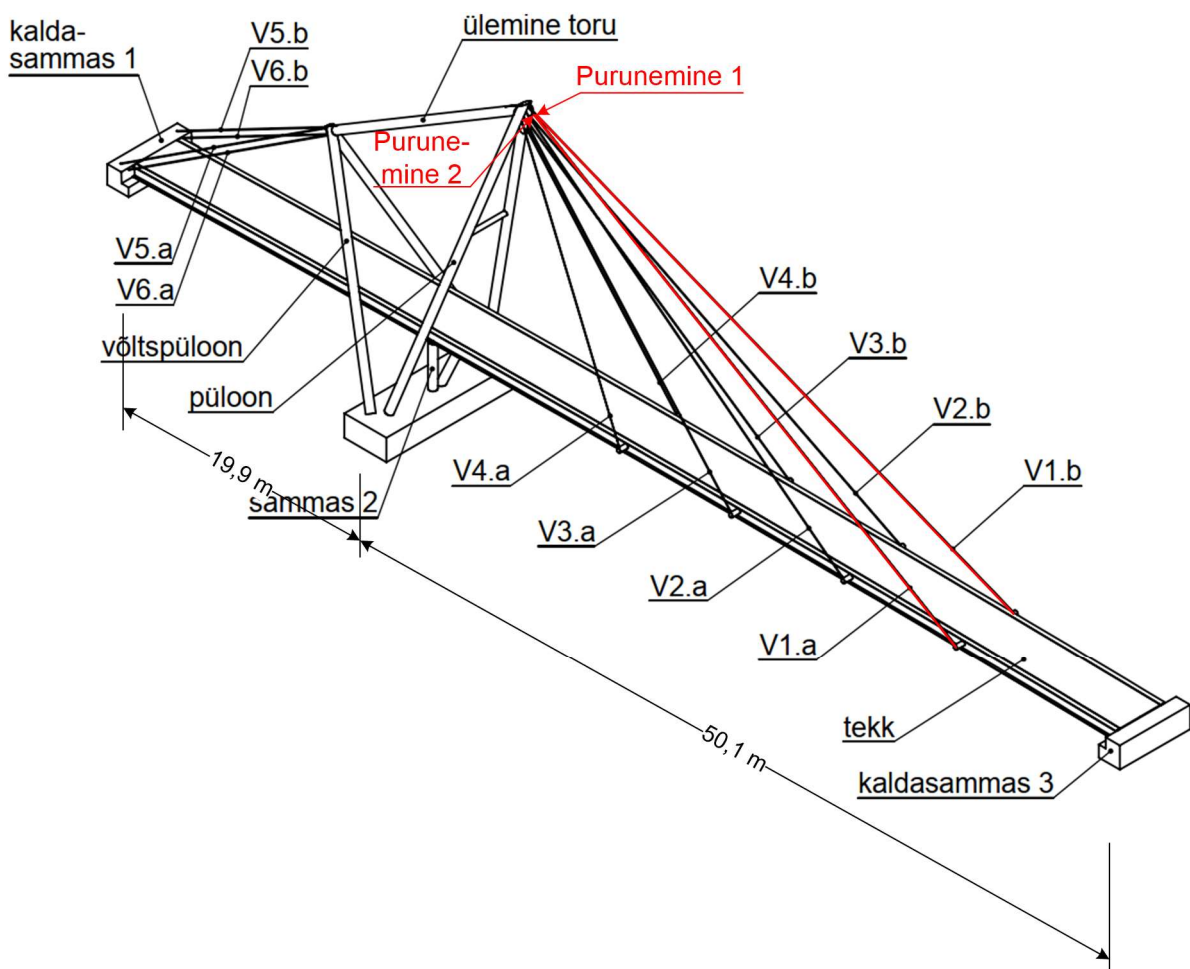
Probleemi nimetus:

Jalakäijate vantsilla vantide väsimuspurunemine

1. Silla kirjeldus

Jalakäijate sild on lahendatud kahesildelise vantsillana (vt. joonis 1), mille sillete mõõtmed on 19,9 m ja 50,1 m. Pülooni kõrgus teki tasapinnast on 15,76 m.

Sillal on 6 paari vante. Vandid on valmistatud ribilise pinnaga terasvarrastest terase klassiga BSt500S. Vandivarraste (V1, V2, ... V6) diameetrid on vastavalt 20, 32, 32, 25, 40, 40 mm. Vandid on jätkatud jätkumutri ja kahe lukustusmutriga.

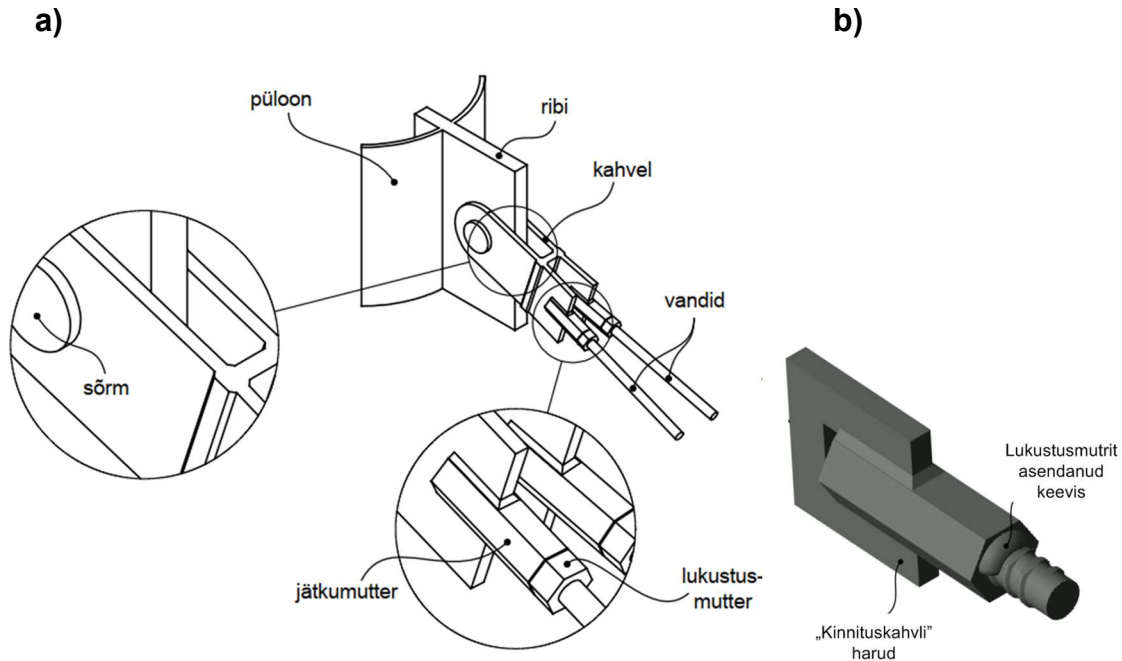


Joonis 1. Silla üldvaade
Punasega on märgitud purunenud vandid ja nende purunemiskohad

Ehitusvigade andmebaas

Vandipaaride ülakinnitus koosneb terasplaatidest konstrueeritud kahvlist ning selle harude külge kinnitatud jätkumutrist (vt. joonis 2a). Vandi ja jätkumutri liite fikseerimiseks on projektlahenduses ette nähtud lukustusmutter. Kahvli ja pülooni kinnitusribi ühendus on lahendatud terasest sõrmega, $d = 52$ mm.

Vantide V1...V4 alakinnituseks on silla teki pikitaladega ühendatud toru, toru alumisele otsale toetuv pingutusmutter ning pingutusmutrile lisatud lukustusmutter.



Joonis 2. Vantide kinnitus pülooni külge (vantide ülakinnitus).

a) projektjärgne lahendus; b) tegelik vantide V1 lahendus

Vandid on valmistatud osaliselt ribilise pinnaga terasvarrastest klassiga BSt500S.

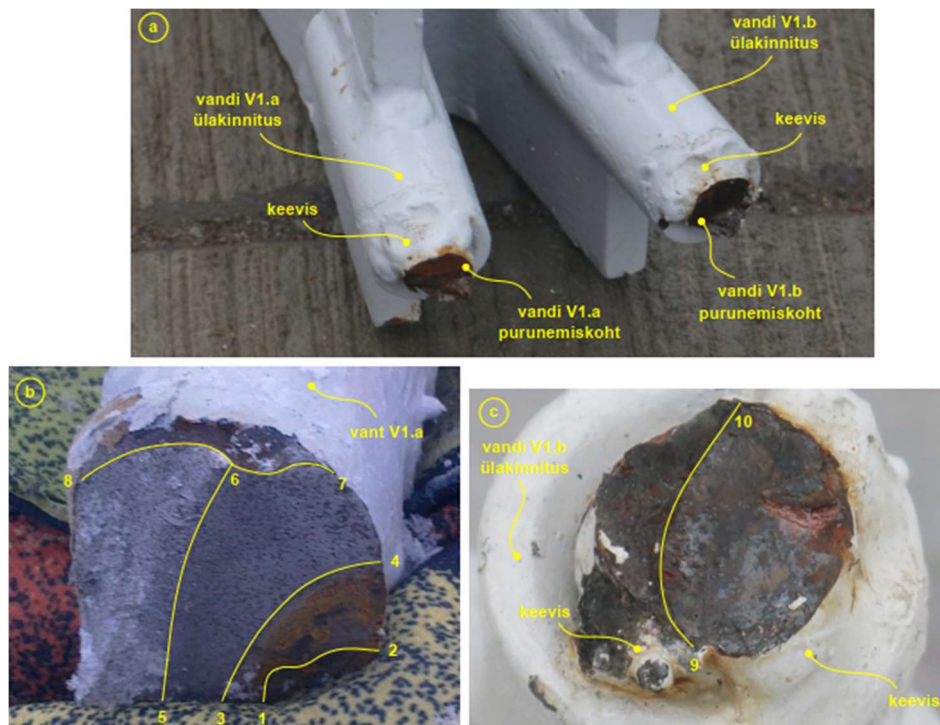
2. Probleemi kirjeldus

Peale silla valmimist märgati, et tuulise ilmaga osa vante vibreerib tuntavalt. Eriti suurt vibratsiooni täheldati kõige peenemates ja pikemates vantides (V1). Pealtnägijate sõnul muutusid vibreeriva vandi piirjooned silmale hägusaks ning vanti puudutades sai justkui elektrilöögi.

Tugeva vibratsiooni põhjusena oletasid ehitaja ja projekteerija liiga suurt (eel)pinget vantides V1, mistõttu otsustati nimetatud vantide pingestusjõude vähendada. Eelpingestuse reguleerimise käigus vant V1b purunes ülakinnituse juurest. Silla valmisest oli möödunud vaid 3 kuud.

Nii katkenud vandi ülevaatus kui tunnistajate täheldatud vantide tugev vibratsioon vihjasid väsimuspurunemisele ning kuna oli alust eeldada, et ka katkenud vandiga V1b identne vant V1a võib lähitulevikus samadel põhjustel puruneda, otsustati sild (jalakäijatele) koheselt sulgeda ning käivitati ekspertiis. Silla projekteerija staatilised arvutused näitasid, et ka purunenud vantideta on silla teki kandevõime omakaalukoormusele piisava varuga tagatud. Vant V1a purunes poolteist nädalat hiljem samast kohast s.o. ülakinnituse juurest.

Purunenud vantide ülakinnitussõlme eemaldamisel selgus, et vantide V1a ja V1b montaaži käigus olid mõlemad lukustusmutrid asendatud keevisega. (vt. joonis 2b). Mõlemad vandid olid purunenud keevise serva juurest.



Joonis 3. Vantide purunemispilt: a) vantide V1.a ja V1.b ülakinnitused; b) vandi V1.a purunemispind; c) vandi V1.b purunemispind.

3. Vantide purunemise põhjus

Vantide purunemise analüüs näitas:

1. Vantide materjali (teras BSt500S) tugevusomadused vastasid nõuetele. Purunenud vantidest võetud proovikehade tõmbeteimimisel määratud keskmine voolavuspiir oli $f_{ym} = 564 \text{ MPa}$, tõmbetugevus $f_{um} = 674 \text{ MPa}$, suhteline deformatsioon maksimaalsel koormusel $\epsilon_{u1,m} = 21 \%$ ja katkevenivus mõõtepiikkusel 10d $\epsilon_{u2,m} = 27 \%$.
2. Pinged vantide V1 terases olid vähemalt kaks korda väiksemad vandi materjali keskmisest voolavuspiirist. Seega vandid ei purunenud staatilise ülekoormuse tõttu.
3. Purunemise põhjustas vantide resonantsvõnkumisest tulenev materjali väsimus. Vantide resonantsi kutsus esile tuule keerisjälje (ingl. k. vortex shedding) mõju, mis ergutas vantide kõrgemaid paindeomasagedusi.

Keerisjalg on füüsikaline nähtus, mis võib tekkida, kui gaasi või vedeliku ühtlane voolamine on mingi keha või objekti poolt takistatud. Takistava keha, milleks on antud juhul vant, külgedele tekivad keerised. Keeriste intervall (sagedus) sõltub tuule kiirusest ning vandi ristlõike kujust ja mõõtmetest. Keerised põhjustavad rõhu pulseerimist, millest tulenevalt hakkab vant tuule suunaga ristsihis võnkuma. Sellise võnkumise sageduse kattumine vandi mõne (painde)omasagedusega viib resonantsini ning võnke- ja paindepingeamplituudide olulise suurenemiseni.

Puhangulise tuule puhul vandi mingi kindla omasageduse võnkeamplituudid üldjuhul märkimisväärselt suureneva ei jõua, sest keerisjälje ergutussagedus sõltub tuule kiirusest. Tuule ühtlasel kiirusel ja seda eriti madala sumbuusega vantide puhul, võivad võnkeamplituudid ning seega ka väsimuskoormus (s.o. vahelduvpinged vandis) märkimisväärselt kasvada. Lisaks - kui vandi võnkeamplituudid ületavad teatud taseme "lukustub" võnkumise dominantne sagedus vandi resonantsagedusele (nn. lock-in fenomen) ning ka tuule kiiruse väike muutumine resonantsi enam ei pärsi.

Vantide väsimuspurunemist kiirendasid järgmised tegurid:

1. Olulisim tegur, miks vandid väsisid vaid umbes 3 kuuga, oli ülakinnituste lukustusmutrite asendamine keevistega. Keevised soodustavad väsimusprao teket nii lokaalsete pingekontsentratsioonide suurenemise kui ka jääkpingete tõttu.
Arvutused näitasid, et ka ilma keevisteta oleksid vandid tõenäoliselt väsinud enne silla projekteeritud kasutusea (50 aastat) möödumist.
2. Vantide väikesest läbimõõdust johtuv keerisjälje ergutussageduse suhteliselt suur väärtus madalatel ja keskmistel tuule kiirustel.
Mida kõrgem on keerisjälje ergutussagedus, seda rohkem väsimuskoormustsükleid (ja väsimuskahjustust) ühes ajaühikus vandile kumuleerub.
3. Vantide võime vibratsioonienergiat summutada (madal sumbuvus).
Keerisjälje võime vante dünaamiliselt ergutada, s.o. tuule suutlikkus vantide resonantsi põhjustada, sõltub olulisel määral konstruktsiooni sumbuvusomadustest. Sumbuvuse suurenemisel maksimaalsed võnkeamplituudid vähenevad ja ka võnkesageduste nn. lukustumine resonantssagedusele on pärsitud.
Mõõtmistulemused näitasid, et vantide sumbuvusomadused olid kesised - sumbuvuse logaritmilise dekremendi väärtus oli suurusjärgus 0.002...0.003.
Võib lisada, et kui vantide sumbuvustegur oleks ületanud teatud taseme, poleks tuule keerisjalg tõenäoliselt suutnud vante väsitada isegi ülakinnituste keeviste olemasolul.

4. Vea kõrvaldamine

1. Purunenud vandid asendati uutega ja nende ülakinnitused teostati vastavalt projektile s.o. kasutati lukustusmutreid, mitte keeviseid.
2. Vantide väsimus- ja vibratsiooniprobleemi vältimiseks paigaldati vandipaaridele V1, V2, V3 ja V4 vibratsioonisummutid. Vibratsioonimõõtmised näitasid, et summutid parandasid vantide sumbuvusomadusi 3...4 korda.

5. Hea ehitustava kohane lahendus

Soovitused projekteerijaile vantide ja riputite tuulekäitumise analüüsiks tuule keerisjälje mõjul:

1. Võimalusel teosta (projekt)arvutused rakendades paralleelselt vähemalt kahte erinevat meetodikat.
2. Arvesta, et ka normides toodud meetoodika ja avaldised võivad viia mittekonservatiivsete tulemusteni, see tähendab väsimusriski hindamist tagavara kahjuks. (Vt. käesoleva veakaardi osa „Muud märkused“.)
3. Juhul kui (projekt)arvutused standardites etteantud sumbuvusparameetritega viitavad, et tuule keerisjälje mõju võib põhjustada vandi või riputi väsimist, siis
 - a) arvuta sumbuvuse logaritmilise dekremendi minimaalne väärtus, mille puhul vandi väsimustugevus on tagatud,
 - b) näe projektis ette vantide tegelike sumbuvusparameetrite mõõtmine peale rajatise valmimist; kui mõõdetud sumbuvuse logaritmilised dekremendid (või sumbuvustegurid) on väiksemad punktis (a) arvutatud minimaalsetest väärtustest, siis näe ette vibratsioonisummutite paigaldus vantidele.

Vantide või riputite sumbuvusparameetrite (isegi väikesest) tõstmisest tavaliselt piisab keerisjälje ja ka muude tuulest tingitud mõjude elimineerimiseks.

Antud juhul on vantide väsimuspurunemist põhjustava resoneeriva vibratsiooni oluliseks vähendamiseks vajalik vibratsioonisummutite paigaldamine.

Muud märkused

Kehtivate eurokoodeksite järgi tehtavad arvutused annavad antud objekti puhul tulemusi, mis ei osuta väsimuspurunemise ohule. Järgnevalt on toodud selle seisukoha täpsem kirjeldus.

Kehtiva standardi „EVS-EN 1991-1-4:2005/A1:2010+A1:2010/NA:2010. Eurokoodeks 1: Ehituskonstruksioonide koormused. Osa 1-4: Üldkoormused“ kohaselt projekteerimisel teostatud vantide väsimuskontroll oleks viinud tulemuseni, kus vantide väsimuspurunemine tuule keerisjälje mõjul on ebatõenäoline. Standardi mittekonservatiivsus tuleneb antud juhul vantide tegeliku ja standardites soovitatud sumbuvusparameetrite 2...3 kordsest erinevusest. Eeltoodud standardi lisa F.5 tabelis F.2 on sumbuvuse logaritmilise dekremendi minimaalväärtuseks antud 0.006 (paralleelkiududega trossid). Vantide tegelik (möödetud) vastav väärtus oli aga 2...3 korda väiksem - 0.002...0.003. Väsimusarvutused standardikohase logaritmilise dekremendi väärtusega näitasid, et vantide tuule mõjust johtuv väsimuspurunemine on ebatõenäoline.

Sama tulemuseni s.o. väsimuspurunemise ebatõenäolisus, oleks projekteerija jõudnud ka juhul, kui oleks arvutused teostanud näiteks terassildade projekteerimist käsitleva DIN-EN 1993-2/NA:2014-10 meetodikast lähtudes. Viimatinimetatud standardis on vantide ja riputite sumbuvuse logaritmilise dekremendi soovituslikuks väärtusena toodud küll ülikonservatiivne 0.0015, kuid DIN-i tuule keerisjälje mõju käsitlev (poolempiiriline) meetodika eeldab, et tuule keerisjalg suudab ergutada vaid vantide madalaimaid omasagedusi (sagedusriba 0...10Hz). Väikese läbimõõduga, pikkade vantide analüüs DIN-i meetodikaga aga annab samuti tulemuseks, et väsimine tuule keerisjälje toimel on ebatõenäoline.