



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOO
INSENERITEADUSKOND
Ehituse ja arhitektuuri instituut

**EESTI TINGIMUSTESSE SOBILIKU PUIKSILLA
PROJEKTEERIMISVÕTTED KAHE
KERGLIIKLUSSILLA NÄITEL**

**DESIGN METHODS OF A TIMBER BRIDGE SUITABLE FOR
ESTONIAN CONDITIONS WITH THE EXAMPLE OF TWO
PEDESTRIAN BRIDGES**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Katriin Vinogradov

Üliõpilaskood: 177481-EATI

Juhendaja: Juhan Idnurm

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud.

Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

"....." 202.....

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

"....." 202.....

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....." 202.....

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, Katriin Vinogradov, (sünnikuupäev: 21.02.1998)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose **Eesti tingimustesse sobiliku puitsilla projekteerimisvõtted kahe kergliiklussilla näitel**, mille juhendaja on Juhan Idnurm,

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

¹*Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil.*

_____ (allkiri)

_____ (kuupäev)

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Katriin Vinogradov, 177481

Õppekava, peeriala: EATI02/17 – Teedehitus ja geodeesia, teede- ja sillaehitus

Juhendaja: Professor, Juhan Idnurm, 5279398

Lõputöö teema:

EESTI TINGIMUSTESSE SOBILIKU PUIKSILLA PROJEKTEERIMISVÕTTED KAHE
KERGLIIKLUSSILLA NÄITEL

DESIGN METHODS OF A TIMBER BRIDGE SUITABLE FOR ESTONIAN CONDITIONS
WITH THE EXAMPLE OF TWO PEDESTRIAN BRIDGES

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Uurida puidu kui ehitusmaterjali omadusi ning kaitsemeetodeid
välistingimustes ehitamisel
2. Projekteerida kaks varianti puidust kergliiklussillale kasutades uurimuses
saadud teadmisi

Lõputöö etapid ja ajakava:

| Nr | Ülesande kirjeldus | Tähtaeg |
|----|--------------------------------------------------------|------------|
| 1. | Teoreetilise tausta uurimine ning uurimuse kirjutamine | 01.04.2023 |
| 2. | Projekteerimise lähteülesande püstitamine | 10.04.2023 |
| 3. | Sildade projekt koostatud | 30.04.2023 |
| 4. | Töö lõppversioon valmis | 16.05.2023 |
| 5. | Lõputöö esitatud | 21.05.2023 |

Töö keel: eesti keel

Lõputöö esitamise tähtaeg: 21.05.2023

Üliõpilane: Katriin Vinogradov
/allkiri/

Juhendaja: Juhan Idnurm
/allkiri/

Programmijuht: Mihkel Kask
/allkiri/

SISUKORD

| | |
|-----------------------------------------------------|----|
| LÕPUTÖÖ ÜLESANNE | 4 |
| LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU | 7 |
| GRAAFILISE MATERJALI LOETELU | 8 |
| SISSEJUHATUS | 9 |
| 1 PUIKSILLAD | 11 |
| 1.1 Puitsildade ehitamise ajalugu | 11 |
| 1.2 Puitsillad välismaal..... | 11 |
| 1.3 Puitsillad Eestis..... | 14 |
| 2 PUIDUST PROJEKTEERIMINE | 16 |
| 2.1 Puidu ehitus ja omadused | 16 |
| 2.2 Puidukaitse | 17 |
| 2.2.1 Puidu keemiline kaitse | 18 |
| 2.2.2 Puidu modifitseerimine..... | 20 |
| 2.3 Ehituslikud võtted | 21 |
| 2.3.1 Puittooted | 22 |
| 2.3.2 Elementide katmine..... | 22 |
| 2.3.3 Liited | 24 |
| 2.3.4 Toepiirkonnad | 27 |
| 2.3.5 Tekiplaatide ehitus | 27 |
| 2.3.6 Muud elemendid..... | 28 |
| 2.4 Ehitusjärgne hooldus..... | 30 |
| 2.4.1 Ülevaatused ja korraline hooldus..... | 30 |
| 2.4.2 Puitsilda ohustavate seente tuvastamine | 31 |
| 2.4.3 Puitsilla renoveerimine | 33 |
| 3 PUIKSILLA PROJEKTEERIMINE | 34 |
| 3.1 Lähteülesanne | 34 |
| 3.2 Olemasolev olukord | 35 |
| 3.3 Projekteerimise piiritlus | 37 |
| 3.4 Talasilla projekteerimine..... | 39 |
| 3.4.1 Kontseptsiooni paika seadmine | 39 |
| 3.4.2 Kandevõime kontroll | 46 |
| 3.4.3 Kasutuspiirseisundi kontroll | 51 |
| 3.5 Sõrestiksilla projekteerimine | 53 |
| 3.5.1 Kontseptsiooni paika seadmine | 53 |
| 3.5.2 Kandevõime kontroll | 56 |
| 3.5.3 Kasutuspiirseisundi kontroll | 66 |

| | |
|------------------------------------------------------------|----|
| 4 PROJEKTEERITUD SILDADE ÜLEVAATUSED JA HOOLDUSPLAAN | 68 |
| KOKKUVÕTE | 69 |
| SUMMARY | 70 |
| KASUTATUD KIRJANDUS | 71 |
| LISAD | 75 |
| Lisa 1 – Sõrestiksilla sisejõud | 75 |
| GRAAFILINE OSA..... | 76 |

LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

- ACQ – kvarternaarsete ammooniumsooladega vaselahus (ingl k Alkaline Copper Quarternary)
- CA – vaskasool (ingl k Copper Azole)
- CCA – vask-kroom-arseen (ingl k Copper Chrome Arsenic)
- CCB – vask-kroom-boor (ingl k Copper Chrome Boron)
- CLT – ristkihtliimpuit (ingl k Cross Laminated Timber)
- SLS – kasutuspiirseisund (ingl k Serviceability Limit State)
- SLT – pingelamellpuit (ingl k Stress-Laminated Timber)
- ULS – kandepiirseisund (ingl k Ultimate Limit State)

GRAAFILISE MATERJALI LOETELU

Lõputöö koosseisu kuulub kaks joonist formaadis A2:

Joonis 1: Talasilla üldjoonis

Joonis 5: Sõrestiksilla üldjoonis

Lõputöö koosseisu kuulub kuus joonist formaadis A3:

Joonis 2: Talasilla piirde kinnitamine

Joonis 3: Talasilla metallkatte kinnitamine

Joonis 4: Talasilla tugiosa

Joonis 6: Sõrestiksilla liitekohtade tüüpsõlmed

Joonis 7: Sõrestiksilla metallkatete kinnitamine

Joonis 8: Sõrestiksilla tugiosa

SISSEJUHATUS

Lõputöö teema on ajendatud autori huvist uurida puitsildade rajamise ning jätkusuutlikuma ehituse võimalusi. Puit on kohalik ning heade omadustega materjal, mida saab ehituses laialdaselt kasutada. Puidust sildade ehitamine on väga pika ajalooga, kuid siiski paljudes küsimusi ja eriarvamusi tekitav teema. Puidust ehitamine on üha pead tõstva keskkonnateadlikkuse taustal muutunud tõsiselt arutatavaks, kuid ometigi tekitab see paljudes kõhklusi – miks ehitada silda puidust, kui on ka pealtnäha lihtsamaid ja kindlmaid lahendusi. Paraku on Eestis kogemusi kokku varisenud puitsildadega ning seetõttu soovitakse üldiselt puidust silla ehitamist vältida. Samas on paljud naaberriigid võtnud eesmärgiks puidu eelistamise teiste ehitusmaterjalide ees. Kuid puitsilla rajamine ei pea tähendama ilmtingimata majanduslikku ega ühiskondlikku riski, kui projekteerimis- ja ehitusprotsess õigesti läbi viia. Lõputööga soovitakse näidata, et puit on sillaehituses tõsiseltvõetav materjal, kui seda õigel viisil ja õiges kohas kasutada.

Lõputöö eesmärk on uurida põhjalikult puidust sildade ehitamist ning süüvida just nimelt küsimusse, kuidas ehitada välistingimustes vastupidavat silda, mis on teras- või raudbetoonsillaga vähemalt võrdväärselt töökindel ja ohutu kasutada. Lõputöö koosneb uurimuslikust ja praktilisest osast.

Uurimistöös tehakse mitmete teadustööde, juhendite ning juhtumipõhiste uuringute põhjal kokkuvõtte olulistest aspektidest, millega tuleb puitsilla projekteerimisel arvestada. See kätkeb endas puitelementide ja kinnitusvahendite materjalide valikut, erinevate kaitsevahendite ning ehituslike kaitsevõtete kasutamise võimalusi ning nõudeid ehitusprotsessile ja hooldusele.

Töö praktilises pooles kasutatakse uurimistöo tarbeks läbi töötatud teadmisi, et projekteerida Eestisse puidust kergliiklussilda kahes variandis. Töö käigus koostatakse põhimõtteline silla lahendus, mis on vastavuses Eestis kehtivatest standarditest tulenevate nõuetega ning mis on läbimõeldud lahendusega ilmastikukindluse aspektist. Praktilise töö juures arutatakse läbi võimalike lahenduste head ja halvad omadused ning võrreldakse olemasolevate ja minevikus olnud sildade uuringutega ja vigadega.

Lisadena on tööle juurde pandud skeemid projekteeritavate sillakonstruktsioonide sisejõududest ning graafilises osas on mõlema silla joonised.

Lõputöös kasutatud programmide loetelu:

- Arvutused – Microsoft Excel
- Joonised ja skeemid – AutoCAD 2022
- Arvutusmudel – Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2022

Märksõnad: puit, puitsillad, projekteerimine, kergliiklussild, magistritöö.

1 PUIITSILLAD

1.1 Puitsildade ehitamise ajalugu

Puit on ehitusmaterjalina tuntud ammustest aegadest. Esimeste isetekkeliste puitsildadena võib käsitleda üle jõe langenud puid, mis võimaldasid inimestel pääseda kuivalt ühelt kaldalt teisele. Inimese poolt edasi arendatud versioon sellisest sillast on üle takistuse paigaldatud palgid. Puitsildade ehitamist soodustas materjali kättesaadavus ja võrdlemisi lihtne kasutus. Tulenevalt puidu elueast pole paraku alles jäänud nii palju iidseid puitsildasid, kui näiteks on kivisildasid. Komposiitsilla põhimõtet tunti juba antiikajal, kus suurematele kaubateedele rajati kivist sammaste ja puidust talade ning tekiga sildasid. [1]

Aastatel 1994-2001 tehti Skandinaavias koostööprojekti „Nordic Wood“, mille eesmärk oli hakata aktiivsemalt kasutama puitu sillaehitusmaterjalina. Aastatel 1994-1999 osales projektis ka Taani. Eesti osales ainult vaatlejarollis. Algatust võib siiski edukaks lugeda, kuna Põhjamaades on puit jäänud tõsiseltvõetavaks ja täiesti konkurentsivõimeliseks ehitusmaterjaliks. [2] Ainuüksi Norras on praegu kasutuses üle 200 puitsilla. Rootsis on aastast 1995 ehitatud keskmiselt 40 puitsilda aastas ning seega on iga neljas rajatav sild puidust. Puitsildade kõige efektiivsema ehitamise ja parima kaitse tagamise meetodid arenevad pidevalt ning nende seisukorda jälgitakse alatasa. Paraku on Põhjamaadeski juhtunud puitsildadega õnnetusi, misjärel teostatakse põhjalikud uuringud ning võetakse tõsise jälgimise ja lisaülevaatuste alla ka teised sarnase ehituse või taustaga sillad. [3]

1.2 Puitsillad välismaal

Rena jõge ületav Kjøllesæteri sild Norras on märkimisväärne saavutus näitamaks puidu kasutamise võimalusi ja usaldusväarsust ka keerulistes oludes. Antud sild on projekteeritud NATO standardi järgsetele liikluskoormustele ning loodud kandma ühes liiklussuunas militaarsõidukite konvoid ning samaaegselt teises suunas tavapärasest liikluskoormust. NATO standard näeb liikluskoormuseks ette omavahel 30-meetriste vahedega liikuvat konvoid, milles iga sõiduk kaalub 109 tonni. 109-tonnine sõiduk kujutab endas veokit, mille treileril kantakse 91 tonni kaaluvat tanki. Kuna Rena jõgi on vajadusel laevatatav, nõudis tellija silla piisavat töökindlust ka olukorras, kus üks

puitpostidel seisvatest sammastest peaks murduma, raskendades sellega koormus-olukorda veelgi. Silla elueaks on ette nähtud 100 aastat ning selle võimaldamiseks on silda töödeldud kaitsevahenditega: esmalt lamelle vaselahusega ning peale liimimist valmiselemente kreosoodiga. [4]

Kjøllsæteri silla puhul on tegu sõrestiksillaga, mis on ehitatud komposiitmaterjalist – betoonist tekiehituse ja osaliselt ka betoonist sammastega ning liimpuidust kandevkonstruktsiooniga. Silla kogupikkus on 158 meetrit ja laius 6,7 meetrit ning pikima ava pikkus on 45 meetrit. Transportimise võimaldamiseks on ühe sõrestikuelemendi maksimaalne pikkus 30 meetrit. Sõlmedes on elemendid ühendatud omavahel sisemiste metall-lehtedega. [4]



Joonis 1.2.1 Kjøllsæteri sild Norras. Foto autor: SWECO Norge AS

Ajalooliselt on laialt levinud olnud kaetud puitsillad, millel on sillakonstruktsiooni peale ehitatud katus. Kuna kandvad puitosad on seeläbi paremini kaitstud ilmastikuolude eest, eeldatakse kaetud sildadel pikemat eluiga. Üldjuhul on kaetud sillad sõrestiksillad. Paljud sajandeid püsinud ja tänaseks turismiattraksiooniks muutunud puitsillad on just nimelt kaetud. Tänapäeval kaetud sildasid üldjuhul enam ei rajata, kuna puidukaitsetehnoloogiad on edasi arenenud ning elemente suudetakse kaitsta ka muudel viisidel. Samuti seavad sildade mõõtmed ja kasutus piirid ette katusega silla ehitamisele –

rajatakse niivõrd pikki ja laiu sildasid, et katuse ehitamine sillale selle kaitsmise eesmärgil ei ole enam otstarbekas. Samuti võivad vihmastes oludes silda läbivad sõidukid endaga hoopis rohkem veepritsmeid kaasa tuua ning kinni ehitatud sild aeglustab kuivamisprotsessi, muutes seeläbi katuse just nimelt probleemseks elemendiks. [5]

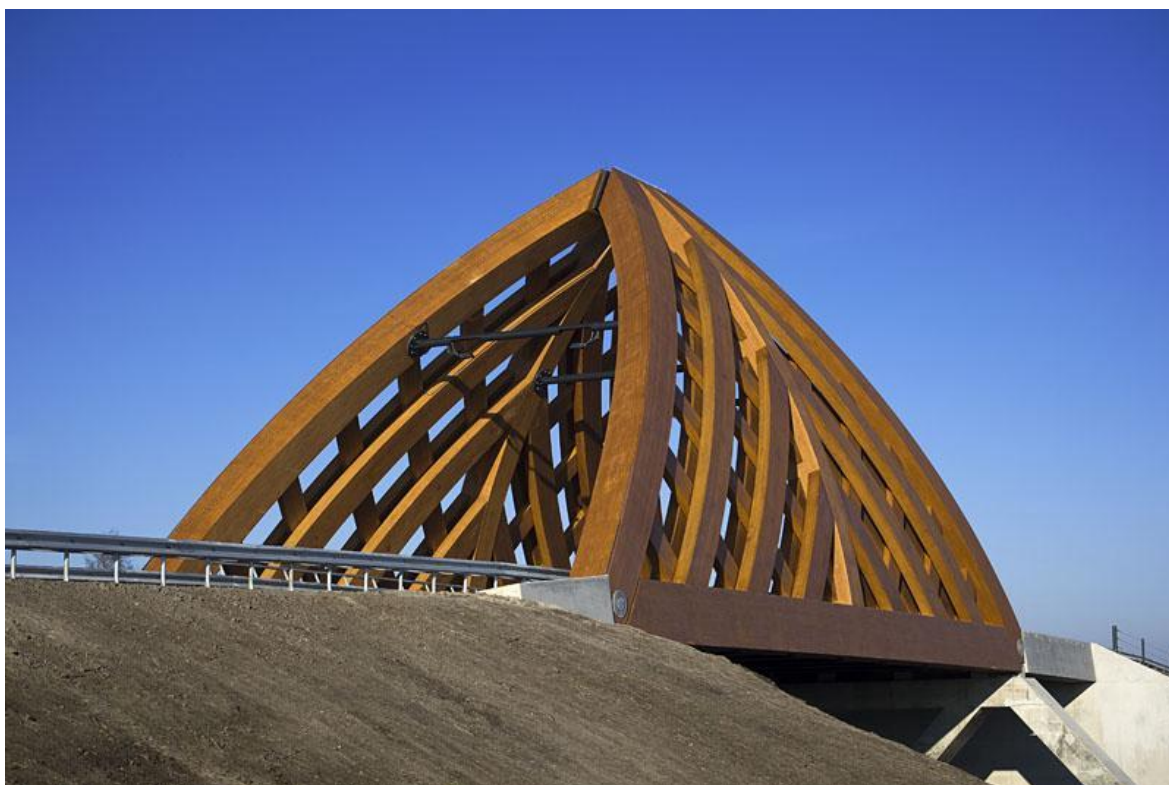
Kapellbrücke on Šveitsis Luzerni linnas asuv katusega sild, mida peetakse Euroopa vanimaks puitsillaks. Sillaga ületatavaks takistuseks on Reussi jõgi, ehitusaastaks peetakse 1333. aastat. Silda on aja jooksul lühemaks ümber ehitatud – praeguseks on see 204 meetrit pikk varasema 285 meetri asemel. Tänapäeval on sild läbitav vaid jalakäijatele ning on linnas oluline turismiattraksioon. Sild hävines osaliselt 1993. aastal tulekahjus, kuid taastati kaheksa kuuga, jättes alles kõik säilinud osad ning ehitades uuesti kõik silla pöördumatult kahjustunud osad. Silla sammaste toestamiseks on rammitud jõesängi tammepuidust vaiad. [1]



Joonis 1.2.2 Kapellbrücke sild Šveitsis. Foto autor: Simon Koopmann

Sneeki sild on märkimisväärne revolutsioon puitsildade ehituses. Sild asub Madalmaades ning ehitati 2008. aastal. Silla ava pikkus on 32 meetrit, laius 14 meetrit. Ületatavaks takistuseks on neljarealine maantee, silla peal liigeldakse kaherealisel sõiduteel ning kergliiklusteel. Disain valiti arhitektuurikonkurssi tulemusena. Tulenevalt arhitekti nägemusest ning Madalmaades kehtivatest puidu keemiliste kaitsevahendite

kasutamise juhistest, valiti materjaliks atsetüülitud puit – selletaoline esmakordne katsetus sillaehituses. Keeruliste sõlmelahenduste teostamiseks kasutati samuti uusi ja ebatraditsioonilisi võtteid – puitelemente ühendavad omavahel sisse puuritud kuni 48 mm läbimõõduga terasvardad, mis on paigaldamisjärgselt täiendavalt ankurdatud epoksiidvaiguga injekteerimise teel. Tulenevalt kasutuses olevast standardist peab silla elueaks olema ette nähtud 80 aastat. Praeguseks pole atsetüülitud puit sillaehituses siiski kasutust leidnud, kuna see on väga kõrge hinnaga. [6]



Joonis 1.2.3 Sneeki sild Madalmaades. Foto autor: John Lewis Marshall

1.3 Puitsillad Eestis

Eestis pole puitsildade ehitamine levinud ning erinevalt Põhjamaadest ei propageerita puidust ehitamist ka riiklikul tasemel. Paraku on Eesti lähiajalukku jäänud uute puitsildade enneaegsed lagunemised, mis on omakorda pidurdanud katsetusi puitsildade rajamisel ning kahjustanud mõningal määral nende mainet. Vaida ja Merirahu sildadega juhtunu on aga ennekõike näide sellest, et puitsilla ehitamine nõuab läbimõeldud ja tarka projekteerimist ning hoolikat ja täpset tegutsemist ka ehitusprotsessis.

Eestis on olnud mitmeid märkimisväärseid puitsildasid, mida suures osas tänaseks enam säilinud ei ole. Palju ehitati ka näiteks sõdades purustatud sildade asenduseks puidust ajutisi sildasid. Märkimisväärsemate näidetena rajati sel viisil Pärnu ajutine puusild ja Kärevere puitsild. Puit on Eestis kergesti kättesaadav materjal, millega oli võimalik võrdlemisi kiiresti ja odavalt uus teeületus rajada. Paljud tuntumad Eestis praegu kasutusel olevad puitsillad on mõeldud vaid kergliiklusele – näiteks Pirita ripsild, Merirahu sild, Tehvandi rolleriraja sild. Sellegipoolest on ka üksikuid avalikel teedel olevaid puitsildasid, mis on mõeldud autoliiklusele – näiteks Keisripalu ja Tagavere sillad.

Järuska puitsild asub Ida-Virumaal ning ületab Rannapungerja jõge. Sild ehitati 2013. aastal ning on 26,4 meetrit pikk ja 4,7 meetrit lai. Ehitus kestis kohapeal kaks kuud ning tööd teostati osaliselt rahvusvahelise seminari töötoa raames ning vabatahtlike abiga. Järuska silla puhul on tegu ainsa Eestis asuva katusega puitsillaga. Praegune sild ehitati kohta, kus oli juba varem kasutuses olnud sild, mille 2010. aastal suurvesi ära viis. Silla kandvaks konstruktsiooniks on liimpuidust sõrestik. Laastkatuse on ehitatud traditsioonilistel meetoditel ning katusekonstruktsioonis on kasutatud vaid tappühendusi. Silla ehitanud ettevõtte inseneri sõnul püsib tänu katusele sild korras vähemalt 100 aastat nõnda, et seda parandama ei pea. [7]



Joonis 1.3.1 Järuska sild Ida-Virumaal. Foto autor: Tiit Kändler

2 PUIDUST PROJEKTEERIMINE

Puit on hinnatud ehitusmaterjal, mida kasutatakse tänapäeval ehituses üha enam. Sel on head tugevusomadused, ning see on võrdlemisi hästi vormistav, muutes selle seega atraktiivseks valikuks eriilmelistes ehituskonstruktsioonides. Puidust silda on võimalik rajada erakordse kiirusega, kuna silla saab valmiselementidena ehitusplatsile tarnida ning järele jääb vaid osad ühendada. [8]

Ehitus on üks keskkonda saastavaimatest valdkondadest. Ehitusmaterjalide tootmine ja ehitusprotsess on väga energiamahukad ettevõtmised. Samuti on praktikas lahendamata lammutamisjärgne materjalide kasutus. Erinevalt teistest ehitusmaterjalidest suudab aga puit enne selle kasutusele võtmist süsihappegaasi sünteesida ning seega ehituse kahjulikku mõju märkimisväärselt vähendada. Lisaks on puit taastuv ressurss, kuna ehituse tarbeks maha võetud puude asemele saab uued istutada. [9]

2.1 Puidu ehitus ja omadused

Puit on orgaaniline materjal ning see eristab teda teistest laialt levinud ehitusmaterjalidest. Puit on oma tiheduse kohta väga heade tugevusomadustega ning seeläbi on õige kasutuse korral võimalik puitkonstruktsioone projekteerida väiksema omakaaluga kui näiteks betoon- või teraskonstruktsioone. [10] Puit on väga hea dünaamiliste koormuste ja löökide vastuvõtmisel. Puidukiud suudavad koormusolukorra muutumisel kaasa liikuda ja pikeneda. Betoonkonstruktsioon võrdluseks seda ei suuda ja deformeerub plastselt. Seetõttu sobib puit väga hästi sildadele ja maavärinaohtlikesse olukordadesse. Suurte alaliste koormuste puhul tekivad puidus aga märkimisväärsed plastsed deformatsioonid. [10]

Puidu nõrkus seisneb selles, et see on orgaaniline materjal. Tüve kasvamisel võib tekkida defekte ning sel juhul pole materjal ühtlase kvaliteediga. Puit on anisotroopne materjal ning selle omadused on eri suundades erinevad. Oksakohad, ebahütlane kasv aastate lõikes ja muud taolised eripärad võivad iga puitelemendi tegelikke füüsikalisi omadusi tugevalt mõjutada. Seetõttu on õige kasutada ehituses vaid sorteeritud kvaliteetset puitu, mille vastavust standardis toodud omadustele võib tõetruuks pidada. [10]

Puit on kergesti süttiv ja tuleohtlik materjal. Kuiv puit süttib ligikaudu 250 kraadi saavutamisel. Puidu väliskiht söestub ning see protsess hoiab sisemised kihid mõnda aega madalama temperatuuri juures, et need ei kahjustuks ja mõnda aega konstruktsiooni veel kannaks. Sillaehituse kontekstis ei valmista see aga erilisi probleeme ja tuleohtu võib põhimõtteliselt eirata. [10]

Samuti mõjub puidule halvasti UV-kiirgus. [8] UV-kiired lõhustavad ligniini. UV-kiired ei suuda puidus kaugele tungida ning otsene mõju on vaid pinnapealne, kuid see-eest moodustuvad UV-kiirte toimel aatomid, mis liiguvad sügavamale puidu sisse ja põhjustavad ulatuslikumaid kahjustusi. [11] Kõige parem kaitse selle vastu on puidu värvimine – mida suurema pigmendisisaldusega värv, seda efektiivsem. [5]

Puit sisaldab endas suhkruid ja tselluloosi ning hemitselluloosi – need meelitavad ligi ka kahjureid. Osad puidukaitsevõtted seisnevadki selles, et need ühendid eemaldada. Üks põhilistest puidukahjuritest on termiidid, kuid Eesti tingimustes võib nende tegevuse välistada. [8] Eestis elutsevad põhilised puidukahjurid on siklased ja toonesepad. Nende tegutsemisperiood jääb soojematesse kuudesse ning nad eelistavad kõrgema niiskussisaldusega vanemat pehmet puitu. Samuti kahjustavad puitu ning eelistavad puitkonstruktsioonide ümber pesasid ehitada osad sipelgaliigid. [12] Kahjurite rünnakutele vastupanuks on paljud puud ise välja arendanud kaitsemehhanismid. Puidus on lõhnastatud keemilised ühendid flavonoidid ning tanniinid, mis mõjuvad kahjuritele eemaletõukavalt, kuid need ei ole siiski nii tõhusad kui tehnilikud kaitsevahendid. Enim on neid just lülipuidus – seetõttu on ka lülipuit looduslikult vastupidavam osa puidust. Samas on lülipuitu oluliselt raskem keemiliselt töödelda kui maltspuitu. [8]

Puidule on välistingimused ohtlikud, kuna liigne niiskus tekitab seente ja mädaniku ohtu. Seen ei ründa puitu, mille niiskussisaldus on alla 20% või mille koed on veeküllastunud. Välistingimustes võib olla sellist nõuet raske saavutada. Eesti kliimaatilised tingimused ei ole kõige soodsamad mädanike eluks, kuna nende kõige edukamaks elutegevuseks on vaja pikemat aega püsivalt ligikaudu 20 soojakraadi. [13]

2.2 Puidukaitse

Puidukaitse põhilised eesmärgid on tagada puidu vastupidavus kahjustavatele mõjuritele. Puidukaitse jaguneb füüsiliseks ja keemiliseks. Füüsilise kaitse tagavad

ehituslikud võtted: puidu katmine, tuulutuse tagamine, hästi lahendatud sõlmed. Keemilist kaitset pakuvad lahustid, immutusvahendid ja muud protsessid, mis muudavad puidu keemilist ülesehitust.

2.2.1 Puidu keemiline kaitse

Keemilise kaitse võimalusi piiravad keskkonna- ja tervishoid. Paljud pikalt kasutusel olnud puidukaitsevahendid on tänaseks kas täitsa keelatud või piiratud kasutustingimustega, kuna nende koostis on inimeste tervisele kahjulik või väliskeskkonda lekkimisel saastav. Seega on osad kaitsevahendid piiratud kasutamiseks vaid välistingimustes. Samas on välistingimustes probleemiks vahendi välja ligunemine – puidule langev vihm või kõrge temperatuur peseb välja keemilised osakesed, mis pole suutnud end puitu siduda. Ligunemisohu tõttu on keelatud osade kaitsevahendite kasutamine näiteks veekogude kohal olevatel puitehitistel. Kõige suurem oht kaitsevahendi lekkimiseks on rajatise kasutusea alguses. [8]

Puitu on võimalik keemiliste vahenditega töödelda vööbates, pihustades, ligundades või rõhu all immutades. Rõhu all immutamine pakub parimat tulemust, kuna sel viisil tungib kaitsevahend sügavale puidu sisse. Samas seab tehnoloogia ja rõhukambri suurus piirid puitelementide mõõtmetele. Vööpamine ja pihustamine on kõige odavam valik – see ei nõua erilist tehnoloogiat ning töid on võimalik reeglina teostada ka ehitusplatsil. Negatiivsest küljest kaitseb vööpamine ja pihustamine puitu vaid pinnapealselt ning kaitsevahend ei suuda eriti sügavale tungida. [8] Keemilise kaitsevahendiga töötlemise efektiivsust mõjutab ka puiduliik. [5]

Kaitsevahend liigub puitu kõige paremini mööda pikikiudusid – nagu ka toitained looduslikult puidus liiguvad. Osade puuliikide puhul on väga hea imendumisvõime ka radiaalsuunas mööda vaigukanaleid. Kõige lihtsam on impregneerida puitu, mis on madala tihedusega. [8] Kõik sisselõiked ja augud elemendis peaksid olema tehtud enne kaitsevahenditega töötlemist, et tagada reaalne toimivus. Vajadusel saab impregneerimisjärgselt puuritud augud vööpamisega tagantjärele katta, kuid see ei taga enam kvaliteetset kaitset. [11]

Olulist rolli mängib tööde järjekord liimpuitelementide puhul. Mida suuremad on puitelemendi mõõtmed, seda raskem on puitu sügavalt immutada ning suhtelises mõistes saab kaitsevahendiga töödeldud vaid välimine osa elemendist. Liimpuitelementide puhul on võimalus immutada lamelle eraldi enne kokku liimimist, puurida

sisse ettenähtud avad ning seejärel teist korda töödelda kogu elementi korraga. Taoline meetod on laialt levinud. Uuritud on lamellide kaitsevahenditega töötlemise mõju liimimisele. Katsetulemused näitavad, et eelnev töötlemine võib suurendada vähesel määral hilisemat delamineerumise ohtu, kuid tõenäosus selleks on marginaalne. [8]

Kreosoot on pikalt kasutuses olnud ja laialt levinud puidukaitsevahend ning teisiti tuntud kui kivisöetõrv. See on õlibaasiline ja viskoosne ning sellest tulenevalt parandab see puidu veekindlust ning liguneb raskemini välja kui vesilahuselised kaitsevahendid. Kreosoot on nii keskkonnale kui ka inimeste tervisele ohtlik, selles on ligi 300 erinevat ainet ning see on väga ebameeldiva lõhnaga. Kreosoodis olev fenool, tõrva hape, tapab puidule ohtlikke kahjureid. Immutamisel tuleb kreosooti kuumutada väga kõrge temperatuurini. Kreosoodi kasutamine on Ameerika Ühendriikides ning paljudes Euroopa Liidu riikides piiratud või täiesti keelatud ning seepärast püütakse arendada teistsuguseid õlibaasil kaitsevahendeid kreosoodi asendamiseks. Kuna kreosooti tuleb immutamisel kuumutada kõrge temperatuurini, on see kulukam kaitsemeetod kui näiteks paljud vesilahused. [14]

Kreosoodiga korralikult töödeldud puit püsib kahjustusteta ligi 30-50 aastat. [11] Samuti pakub kreosoot väga head kaitset UV-kiirte eest. Õlibaasilised vahendid muudavad puidu UV-kiirte toimel hallikaks. [14] Kuna kreosoot on õlibaasiline, nõrgestab see oluliselt liimi sidumisvõimet ning seetõttu saab seda kasutada vaid valmiselementide impregneerimisel. Liimpuitelementide puhul on lahendus esmalt töödelda eraldiseisvad lamellid mõne vesilahusega, liimida osad kokku ja seejärel töödelda tervet elementi kreosoodiga. [11] Kreosoodiga töödeldud puitu ei saa värvida. [5]

Tänapäevasem alternatiiv kreosoodile on pigmendiemulsiooniga kreosoot. Lahusele on lisatud pigmente, mis teevad segu stabiilsemaks ning aeglustavad kreosoodi välja ligunemist. [14]

Vasepõhised vesilahused on puidukaitsena pikalt kasutuses olnud. Vask pakub väga head kaitset mädanike vastu, kahjurite jaoks lisatakse lahusesse teisi kemikaale. Vask pakub eriti head kaitset pehmemädaniku vastu. Vasel on ka kerged kaitseomadused UV-kiirguse vastu, kuid põhjalikumaks kaitseks tuleks pinda täiendavalt töödelda. Vasepõhised vesilahused ainuüksi puitu hüdrofoobseks ei muuda. [15] Kuna vaskoksiidi molekul on liiga suur, et edukalt puitu imbuda ja sinna ka kinnituda, kuid samas liiga väike, et sealt mitte välja lekkida, kasutatakse mitmetes lahustes – nagu näiteks CCA

ja CCB – kroomi, mille eesmärk on olla vesilahuses keemiline sideaine. [11] Vasepõhiste vesilahustega töödeldud puitelemente on võimalik kuivanuna üle värvida. [5]

Vask ei paku puidule kaitset kahjurite ja ka mõningate seeneliikide eest. 1933. aastal võeti seetõttu kasutusele CCA – arseeniga vaselahus. Arseen pakub lisakaitset nii nende seente suhtes, mis olid vase suhtes immuunsed, kui ka kahjurite suhtes. Õigesti peale kantud CCA peaks puidule kaitset pakkuma kolmekümneks aastaks. Arseen on aga juba väikestes kogustes mürgine kemikaal ning sel põhjusel on tänaseks päevaks selle kasutus tugevalt reguleeritud ning paljudes kohtades lubatud kasutamiseks ainult osaliselt näiteks välistingimustes ja kohtades, kus inimesed kaua ei viibi. [11]

Vähemtoksilise alternatiivina CCAle loodi CCB – booriga vaselahus. CCB pakub eriti tõhusat kaitset pehmemädaniku vastu. Boori on kasutatud ka iseseisvalt puidukaitsevahendina putukate vastu. [11]

Lahustes on kroomi asemel palju kasutatud ka ammooniumi, näiteks vaskasoolides ning ACQ-s. Ammooniumsoolad parandavad lahustumist ning hõlbustavad vahendi puidu sisse tungimist. Samuti on ammooniumiga kaitsevahendid ohutumad kui CCA ja CCB. [11] Kaubamärgi Tanalith® E all Eestis laialt tuntud kaitsevahend on vaskasool ning levinud alternatiivina CCAle ja CCBlle. ACQ puhul on vasele ja ammooniumile lisatud biotsiide, mida kasutatakse ka taimekaitses. ACQ ja CA põhised kaitsevahendid on keskmiselt 10% kallimad kui klassikaline CCA. [15]

2.2.2 Puidu modifitseerimine

Puidu modifitseerimine kujutab endast puidu struktuuri muutmist. Eesmärk on eemaldada või välja vahetada osa puidust, mis põhjustab seente ja kahjurite rünnakuid. Puidu modifitseerimine on keskkonnasäästlikum kaitsemeetod, kui keemiline töötlemine. [8]

Termotöötlusel kuumutatakse puitu kõrge temperatuurini, mistõttu laguneb hemitselluloos ning hävinevad puidus sisalduvad suhkrud ja vaigud. Nende puudumine muudab puidu kahjuritele ebaatraktiivseks. Samuti on termotöötamise tagajärjel puidu niiskussisaldus madalam. Termotöödeldud puit on mahumuutuste suhtes stabiilsem ning selle mass on väiksem. Kõrge temperatuuriga termotöötamise järel – 200 kraadi juures – muutub puit märgatavalt hüdrofoobsemaks. [8] Hemitselluloos hakkab lagunema juba 160 kraadi juures. [11]

Termotöötlaste negatiivseks tagajärjeks on märgatav tugevuse langus – termotöötlaste puit on madalama jäikusega ning olenevalt puuliigist kuni 40-50% madalama survetugevusega. Sel põhjusel leiab termopuit kandvates konstruktsioonides vähe kasutust ning on pigem levinud voodri- ja terrassimaterjalina. Kohtades, kus on pidev kokkupuude vee või maapinnaga, ei tohi termopuitu kasutada. [8] Termotöötlaste tulemusena alanenud niiskussisaldus võib põhjustada halvemat sidumisvõimet veepõhiste liimide kasutamisel. [11]

Atsetüülimine on puidu modifitseerimise protsess, kus hemitselluloosis ja tselluloosis sisalduvad hüdroksiidühendid asendatakse atsetüülrühmaga. Seeläbi kaotatakse puidust tselluloosid, mis meelitavad kahjureid või võivad mädaneda. [8] Atsetüülimise käigus tõuseb puidu mass, kuid tugevusomadused ei muutu. Üldtunnustatud arusaamade järgi peetakse 20% massi juurdekasvu piisavaks, et saavutada nõutud vastupidavus bioloogiliste tegurite vastu. Atsetüülitud puit on võrreldes teiste töödeldud puitudega oluliselt väiksemate mahumuutustega. [8]

2.3 Ehituslikud võtted

Puit on niiskuse suhtes tundlik. Mädanikud ja seened ründavad puitu, kui sellel on kõrge niiskussisaldus. Selleks, et puit liiga niiskeks ei saaks, on võimalik kasutada ka ehituslikke võtteid elementi füüsiliselt kaitstes. Kuivõrd rajatiste puhul on tihtipeale välistatud puitkonstruktsioonide ehitamine katuse alla, tuleb kasutada muid lahendusi, et kaitsta ennekõike kandvaid elemente ning puidu kõige õrnemaid osi ja välistada võimalus vee või niiskuse kogunemiseks. Sild peab olema projekteeritud nõnda, et elementide läheduses ei oleks soodsat võimalust orgaanika ja muu prahi kogunemiseks. Selle vältimiseks on ülimalt vajalik ka regulaarne hooldus. [5]

Vajadusel on võimalik silla külge paigaldada statsionaarsed niiskussisalduse mõõdikud, et monitoorida puitelementide seisukorda. Kuivõrd see ei ole tavaline lahendus, saab seda vajadusel siiski väga edukalt kasutada. [5]

2.3.1 Puittooted

Puitsildade ehitamise puhul pole välistatud ükski sillatüüp ning erinevate sildade ehitamiseks on võimalik kasutada mitmesuguseid puittooteid. Põhilisteks puittoodeteks sillaehitusel on kas naturaalne täispuidust saematerjal või liimpuit.

Saematerjal on ajalooliselt pikalt kasutuses olnud ehitusmaterjal, kuid tänapäeval seab see liigsed piirangud elementide võimalikele mõõtmetele ja kujule. Isegi kui kasutada suure ristlõikega palke, oleks immutamise keeruline ning tulemus kehv, kuna normaaltingimustes ei suuda kaitsevahend tungida suure ristlõikega elemendi keskele. Samuti jäävad enamlevinud saematerjali tugevusomadused alla enamlevinud liimpuidu tugevusomadustele. [10]

Liimpuit on edasiarendus, mille puhul liimitakse eelnevalt mõõtu lõigatud lamellid kokku, et saavutada soovitud elemendi mõõtused ja kuju. Seeläbi on võimalik võrreldes puitelementidega suurendada mõõtused nii ristlõikes kui ka pikkuses. Klassikalise liimpuidu puhul asetsevad kõigi lamellide pikikiud samas suunas. Liimpuidu lamellid on sõrmjätkatud. Liimpuittalasid on võimalik saada nii homogeensel kui ka kombineeritud kujul. Homogeensed liimpuitelemendid koosnevad lamellidest, mis on kõik võrdse tugevusega. Kombineeritud liimpuittala lamellid on erineva tugevusega – äärmised lamellid, kus tööolukorras pinged on suuremad, on tugevamast puidust, kuni 2/3 ulatuses kasutatakse seesmisteks lamellideks aga nõrgema tugevusklassi puitu. Kombineeritud liimpuittala on madalama surve- ja tõmbetugevusega kui võrdse tugevusklassi homogeenne liimpuittala. [10]

Enne lamellide kokku liimimist peab niiskussisaldus puidus olema viidud 6-15%-ni. Et elemendile kaarjat kuju anda, aurutatakse algul puitu, et ta oleks kuum ja niiske, pannakse sobilikku vormi, kus lamellid saavad vajalikku kuju hoida, ja seejärel kuivatatakse. Liimpuidu suurusele seavad piirid transport ja kaitsevahenditega töötlemise võimalused. [5]

2.3.2 Elementide katmine

Puitelementide katmine on lihtsaim viis, kuidas vältida liigset niiskussisaldust ja kahjustuste ohtu. Katmisel tuleb jälgida, et katematerjali ja puitelemendi vahele jääks piisavalt ruumi igasuguse tekkinud niiskuse välja tuuldamiseks. Seetõttu peab kate olema asetatud näiteks lattidele, mis tagab 10 mm õhutusvahe. Kattena on hea

kasutada näiteks korrodeerumise eest kaitstud lehtmetsa. Elemendi katmisel küljelt võib kasutada ka puitvooderdust, kui on vaja tagada visuaalselt ilusam lahendus. Puitvooderdus peab olema hüdrofoobne. Halvasti või üldse mitte tuulutatav kate võib puitelemendi lagunemisprotsessi hoopis kiirendada. Katmine kaitseb puitelemente ka päikesest tingitud kuivamise ja pragunemise ning liimpuidu delamineerumise eest. [8]

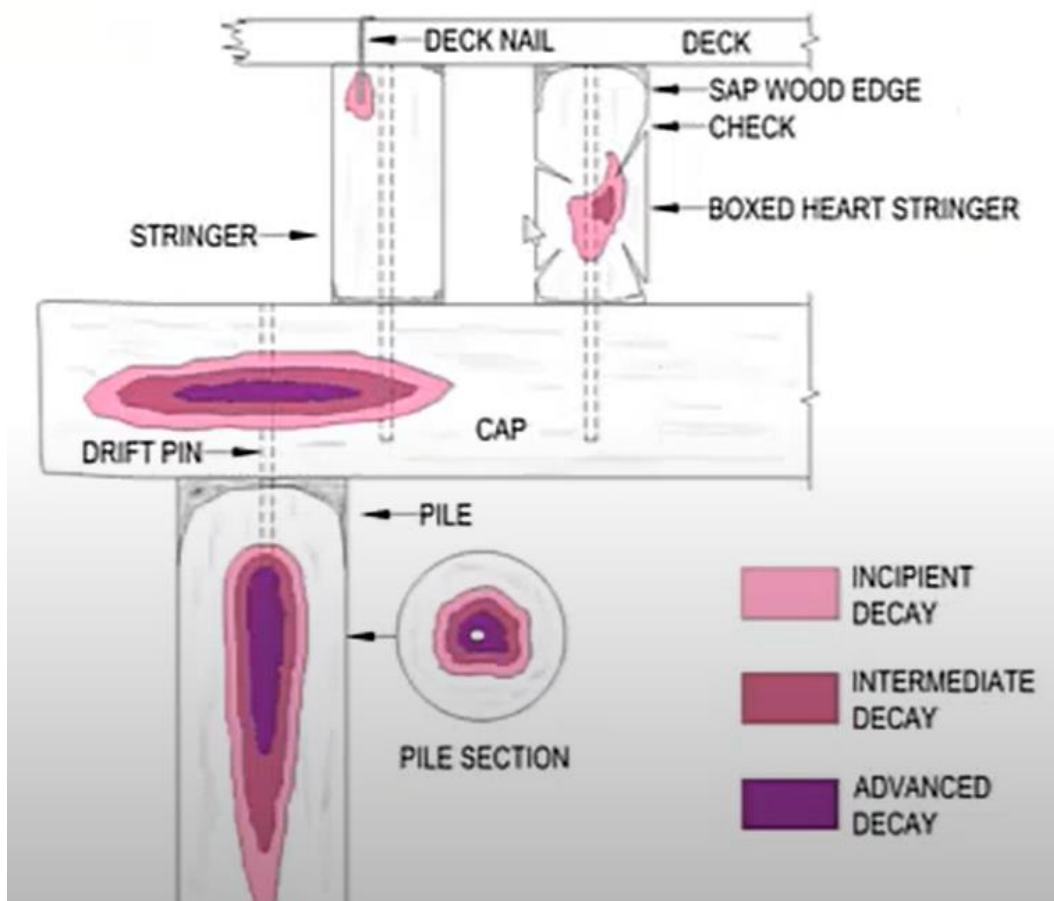


Joonis 2.3.2.1 Ülapinnalt vask-lehtedega ja külgedelt tuulutava puitvooderdusega kaetud sild.
Foto autor: Rune Abrahamsen, SWECO Gröner AS

Puitelemendi lõige, mis on tehtud ristipidi pikikiuga, peab olema väga hästi kaitstud. Puud transpordivad toitained ja vett pikikiudu, sama omadus säilib ka ehitusel. Seetõttu tuleb eriti hästi kaitsta elemendi otsasid. Lisaks veele levivad pikikiudu väga hästi mädanikud. Elemendi otsasid saab edukalt kaitsta kattes need epoksiidi või akrüülmördiga. Akrüülmörti kasutatakse laialdaselt puitsildade ehitusel Põhjamaades, kuid see on väikese survetugevusega ning purunedes puitelemendile enam kaitset ei paku. Seetõttu tuleks vältida selle kasutamist piirkondades, kus esineb suuremaid survejõudusid. [5]

2.3.3 Liited

Liited on puitehitiste üks kõige õrnemaid piirkondi. Liidetes võib olla mitme elemendi kontaktpindasid, kus tuleb jälgida tuulutuse võimalikkust ning seisva vee ära juhtimise süsteeme. Liiteid võib olla raske või võimatu tõhusalt katta. Samuti tuleb kinnituste võimaldamiseks puurida auke ning teha sisselõikeid – need on lisapinnad, kus vesi ja mustus saavad koguneda ning puidukiud on avatud kahjulikele mõjutustele. Liidete puhul tuleb jälgida, et kinnituselement ei läbistaks sillale veekindlust tagavaid elemente – näiteks hüdroisolatsioon – ning ei tekitaks puitu läbistades bakteritele ja mädanikele otseteed elemendi sisse. Puitu läbiv kinnituselement võib otseselt kahjulik olla näiteks olukorras, kus kinnitus kulgeb vertikaalselt läbi katmata horisontaalse pinna, millele saab vesi koguneda. Sel viisil saab vesi liikuda otse puitelemendi sisse ja luua soodsad tingimused kahjustuste tekkeks. [5]



Joonis 2.3.3.1 Mädaniku tekke ja levimise viisid. [16]

Sõrestikuvarraste või muude kerge kalde all olevate vertikaalsete postide liitumiskohas võib tekkida oht mustuse, lume ja vee kogunemiseks kahe eraldiseisva puitelemendi vahel. Lahendus seal niiskuse akumulatsioonide vältimiseks võib olla vajaliku nurga alla

painutatud korrosioonikindla metallnurga paigaldamine. Sel viisil kogunevad vesi ja mustus metallile, mitte otse puitelementide liitekohta. [5]

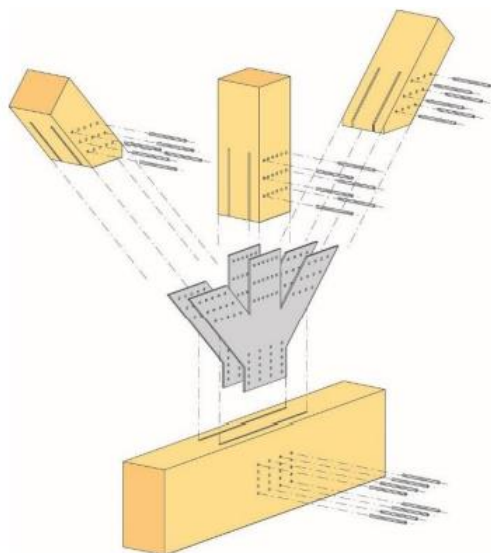


Joonis 2.3.3.2 Metallist kaitsev nurgaelement. [5]

Metallist kinnitusvahendite kasutamisel tuleb veenduda nende vastupidavuses korrodeerumisele, kuna puit on kergelt happeline ning keemilistel kaitsevahenditel võib olla omakorda negatiivne mõju metallidele. Sobilikud on näiteks galvaniseeritud või roostevabad detailid. [5] Seejuures tuleb silmas pidada, et galvaniliselt töödeldud ning roostevabad elemendid ei tohi omavahel kokkupuutes olla. [17] CCA-ga immutatud puitelemendis korrodeerub aga ka galvaniseeritud kinnituselement. [5] Eestis levinud puitudest on kuusk iseäranis happeline ning vajab teatud happekindlusega kinnitusvahendit. Kreosoodiga töödeldud elementide puhul tasuks tsingitud elemente kasutada vaid siis, kui sõlmkoht on vee ligipääsu eest kaitstud, kuna nende tegurite koostoimel on tsingikihi kaitsevõime madal. Omavahel ühenduses olevad metallelemendid ei tohiks olla erinevatest materjalidest, kuna seetõttu tekib galvanilise korrosiooni oht. Vasega kokkupuutel võivad teised metallid niisketes oludes korrodeeruma hakata, iseäranis tugev reaktsioon vasest põhjustatud korrosioonile on tsingitud detailidel. [18]

Niiskus ning mahumuutused võivad kinnitusvahendite piirkonnas tekitada täiendavaid pingeid. Liitekohtades, kus elemendid on väga jäigalt kinnitatud ning on kasutatud suurt hulka kinnitusvahendeid, on ristlõike mõõtude muutused niivõrd piiratud, et materjalis tekivad lisapinged juba iseenesest ning liitekohas võivad areneda praod. Katsete tulemusel on avastatud, et nendel põhjustel on liitekohad, kus kasutatakse sisemisi metall-lehtedega ühendusi, arvutuslikust eeldatavast tegelikkuses nõrgemad. [5]

Elementide omavahelisel kinnitamisel kasutatakse nii väljapoole kui ka puidu sisse peidetud metall-lehti. Kuigi väljapoole kinnituvaid lehti oleks lihtsam kasutada, on see siiski halvem lahendus, kuna tuulutusvahet lehe ja puidu vahel pole võimalik saavutada ja seega on niiskuse kogunemise ja piirkonda kinni jäämise oht. Sisemised metall-lehed selliseid probleeme ei tekita ning liitekoht jääb võrdlemisi ilmastikukindel. Metall-lehed ja puitelemendid saab omavahel ühendada naaglitega. Naaglitele oleks vajalik ette puurida veidi suuremad augud, et mitte tekitada puidu pragunemise ohtu. Silmas tuleb ka pidada, et naagel ei saa töötada tõmbejõule. Taoliselt ühendatud liited saab peale monteerimist akrüülmördiga täita ning ülevaatuste käigus pidevalt kontrollida, et välistada kinnituselementide välja loksumist. [5] Kruviga elementide kinnitamisel tuleb auk väiksemana ette puurida ja alles peale seda kruvi sisestada. Augu ettepuurimisel lõigatakse puidukiud otse läbi, vastasel korral vigastatakse ja keerutatakse kruvi sisse puurides kiudusid ning sisejõudude ülekanne muutub korrapäratumaks. [19]



Joonis 2.3.3.3 Sisemiste metall-lehtedega kinnitusviis. [5]

Kuivõrd sisemised lehtkinnitused on puitsillaehituses laialt levinud ja hea lahendus kahjustusekindluse tõttu, on teisalt probleemne selliste liitekohtade jälgimine silla kasutusea jooksul. Sel põhjusel tuleks taolised liited eelistatavalt projekteerida vastupidavaks kogu silla eluea pikkuses. [5]

Katsetatud on ka elementide liitmist pikkade varrastega, mis puuritakse ühte elementi sisse, pannakse teise elementi puuritud aukudesse ja injekteeeritakse lõpuks epoksiidvaiguga. Selline liitekohta lahendus pole aga tänaseks standardiseeritud ning kuna injekteeerimise edukuses ei saa täielikult veenduda, on taoline liide ettearvamatu.

Taoline liitekoht on väga hea sisejõudude ülekandmises. Varraste asetamisel nurga all elemendi pikitelje suhtes saab suurendada nende vastupanu väljatõmbele. [5]

2.3.4 Toepiirkonnad

Puitdetail ei tohi olla kontaktis maapinnaga, kuna seeläbi on niiskusel otsene ja pidev võimalus puitu tungida. Absoluutselt minimaalseks vahemaaks puidu ja maapinna vahel võib olla 100 mm, kuid tegelikkuses ei soovitata väiksemat vahemaad kui 400 mm. Seejuures tuleb jälgida, et silla all ja ümber olev haljastus ei puutuks kokku puiduga. [5]

Silla all olevat haljastust tuleb piirata korralise hoolduse käigus. Hea lahendus on kaldasambad tugistada munakividega, plaatidega või muul sarnasel viisil, et välistada taimestiku kasvu võimalus. Hea oleks jätta äärmised tugiosad võimalikult palju tekiplaadi alla, et oleks loomulik tugiosade piirkonna kaitse mustuse ja orgaanika kogunemise eest. [5]

Puitelement ei tohi olla otseses kontaktis betoonpinnaga, kuna viimase tõttu võib puit niiskuda. Enamasti on sillakonstruktsioonides puidu ja betooni võimalikud kontaktpinnad tugiosades. Tugiosadel peaksid olema ette nähtud kalded vee ära juhtimiseks. [8]

2.3.5 Tekiplatide ehitus

Kõige lihtsam viis puidust tekiplatide ehitamiseks on lamellide omavaheline kokkuliitmine nii, et need moodustaks ühtse plaadi. Lamellide omavaheliseks liitmiseks ühtseks plaadiks on mitmeid võimalusi.

Valmistootena on võimalik kasutada CLT-plaate. Nende puhul on suurimaks miinuseks see, et saada val on ainult kindlate mõõtudega plaadid. Plaadid koosnevad alati paaritust arvust kihtidest, et välimised kihid oleks samas suunas orienteeritud kiududega – see tagab suurema tugevuse. [19]

Rohkem kasutatud leidev lahendus on pingelamellplaadid. Sellise plaadi puhul on kõrvuti asetsevad lamellid ühendatud tõmbidega, mis sisestatakse eelnevalt ette puuritud aukudesse. Plaadi pikitelje suunas pikendatud lamellid ei tohi olla jätkatud ühes lõikes.

Plaadi projekteerimisel on oluline silmas pidada, et tõmbide otstes olevad seibid peavad olema piisavalt suured, et mitte muljuda puitelemendi sisse – seda ka oludes, kus puit võib olla niiskunud ja sellevõrra pehmem. Seetõttu on oluline tagada ka äärmiste talade kaitse vee eest. SLT-plaadiga on tagatud lamellides sisejõudude jagunemine nagu ühtses plaadis. Vastavalt vajadusele ning mõõtudele saab plaadi valmistada ja pingutada tehases või ehitusplatsil. [5]

Tekiplaatide kaitsemeetodite väljatöötamisel tuleb arvestada kaldvihmaga. Tuleb arvestada, et plaadi äärmine külg ja näiteks talasilla puhul ka äärmine tala oleks kaitstud vihma eest, mis sajab 30-kraadise nurga all. Selleks on võimalik pikendada mittekandvat tekielementi nõnda, et kandev element oleks kaitstud. Kui see pole võimalik, on sobilik lahendus äärmise külje katmine näiteks metall-lehega. Visuaalselt kenama lahendusena saab metall-lehe asemel ka puitlaudist kasutada, kuid sel puhul tuleb arvestada silla eksploatatsioonieegse nõudlikuma hooldusega. Katmisel tuleb jälgida korraliku tuulutuse tagamist ning ka kattematerjalilt vee ära juhtimist, näiteks vajadusel veenina lisamist. [5]

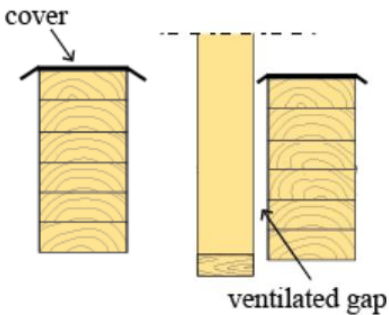

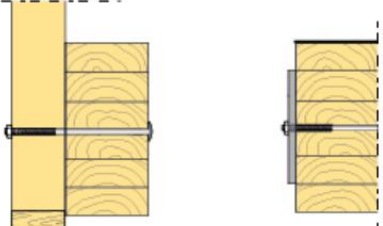
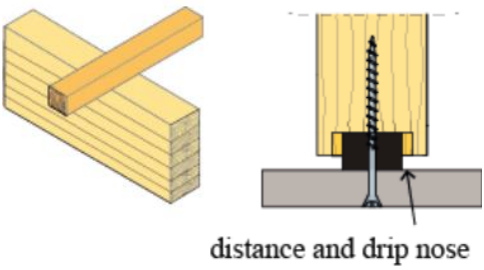
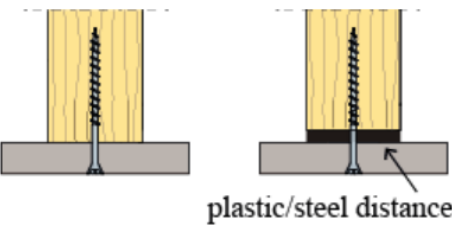
Tekiplaat peab olema vetthülgav ka pealtpoolt. Tekiplaadi ja teepinna vahele tuleb ette näha hüdroisolatsioonikiht. Hüdroisolatsioonikihi konkreetne paigutamistehnoloogia määratakse üldjuhul tootja juhistes. Tavapärane moodus tekiplaadi veetihedaks muutmiseks on kleebitava rullmaterjali paigaldamine lamellidest ehitatud plaadile või valmiskilbile ning seejärel selle kaitsekihiga ja järgnevate asfaldikihtidega katmine. Kasutatakse ka meetodit, kus algul laotatakse puittekile kaitsekiht, sellele paigaldatakse hüdroisolatsioon ning alles seejärel asfaldikihid. Puidust tekiplaadile bituumenrullmaterjalist hüdroisolatsiooni paigaldamisel tuleb silmas pidada, et puidu niiskussisaldus ei oleks liiga kõrge, kuna see võib soodustada hüdroisolatsiooni ja sillakonstruktsiooni vahelist kehva naket ja õhumullide tekkimist. Õhumullid tekivad kergemini ka õhukese kaitsekihi korral. Õlibaasil kaitsevahenditega töödeldud puit tekitab enamasti kehvemat naket hüdroisolatsiooniga ning vajab ettevalmistustööd enne membraani paigaldamist. Puidust teepinna puhul tuleks kasutada hüdrofoobset puitu, näiteks õlitatud või termotöödeldud lauda. [20]

2.3.6 Muud elemendid

Erisugused kommunikatsioonid, mis on ette nähtud kinnitada silla külge, peaksid kulgema varjatud kohas, näiteks silla alt, et nende peale ja vahele ei saaks koguneda praht. [5]

Piirded on puitsilla keerukas osa, kuna neid on raske peita ilmastikumõjude eest nagu enamust kandvaid konstruktsioone. Samuti on tihtipeale ainus võimalus kinnitada neid tekiplaatide ja kandvate konstruktsioonide külge. Sel põhjusel tuleb eriti suurt tähelepanu pöörata piirete kinnitusele ning et võimalik vesi saaks ära juhitud enne, kui see kinnituselementideni jõuab. Võimalikud lahendused olenevad piirde tüübist – näiteks saab piirde alaotsa projekteerida veenina või panna teraslehe piirde ja ülejäänud konstruktsiooni vahele. [5]

Tabel 2.3.6.1 Puitelementide konstruktiivsete lahenduste hinnangud. [5]

| Hinnang | Olukorra kirjeldus | Näide |
|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Suurepärane | <p>Elemendi vertikaalne pind on kaetud. Elemendil on tagatud igas suunas suurepärane õhutusvahe, vähemalt 10 mm.</p> <p>Näiteks: Horisontaalse tasapinnaga kaetud element, millel pole kontaktpinda teiste elementidega või on nendega piisav vertikaalsuunaline vahe.</p> |  <p>The diagram shows a cross-section of a wood element. On the left, a 'cover' is shown on top. On the right, a 'ventilated gap' is shown between the element and the surface below it.</p> |
| Hea | <p>Elemendil on head tuulutustingimused, kuid pole tagatud seisva vee ärajuhtimine.</p> <p>Näiteks: Horisontaalse tasapinnaga katmata element, millel pole kontaktpinda teiste elementidega.</p> |  <p>The diagram shows a cross-section of a wood element with a gap below it, but no cover is present on top.</p> |
| Keskmine | <p>Element on vee eest kaitstud, kuid tuulutusvahede olemasolu pole tagatud.</p> <p>Näiteks: Vertikaalsuunalised ühenduspinnad tuulutusvaheta.</p> |  <p>The diagram shows a cross-section of a wood element with a vertical joint and a gap below it.</p> |
| Rahuldav | <p>Element pole vee eest kaitstud ning tuulutusvahede olemasolu pole tagatud. Lõikekoht risti pikikiudu, vee ligipääs on vähene ning tuulutusvõimalus on olemas, elemendi lähiümbrus on puhastatud.</p> <p>Näiteks: Horisontaalsuunalised ühenduspinnad.</p> |  <p>The diagram shows a cross-section of a wood element with a horizontal joint and a gap below it. A 'distance and drip nose' is shown below the element.</p> |
| Kehv | <p>Lõikekoht risti pikikiudu on tuulutusvõimaluseta ning vee ligipääs ja kogunemine pole takistatud.</p> <p>Näiteks: Puidu pikikiuga kontaktis olevad pinnad.</p> |  <p>The diagram shows a cross-section of a wood element with a horizontal joint and a gap below it. A 'plastic/steel distance' is shown below the element.</p> |

2.4 Ehitusjärgne hooldus

Puitsilla eduka rajamise ja kasutamise osa on ka pidev ülevaatuste ja hooldustööde teostamine. Alustama peaks sellest, et projekteeritud sillal oleks hõlbus teostada ülevaatusi ning renoveerimisi. [5] Eestis on ette nähtud silla elueaks 100 aastat ning kogu elukaare jooksul vajab see jälgimist.

2.4.1 Ülevaatused ja korraline hooldus

Puitsilla ülevaatus on soovituslik teostada kindlasti ka kohe peale vihma, sest nii on lihtsam hinnata veekahjustuste olemasolu või tekkimise võimalikkust. Ülevaatus käigus on oluline tähele panna ja uurida iga defekti, kuna see võib viidata mädanikule või niiskuskahjustusele, mis võib hakata veel mädanikku tekitama. Soovituslik oleks regulaarselt teostada ka puitelementide niiskussisalduse kontrolli. [5]

Tabel 2.4.1.1 Puitelementide kahjustused. [5]

| Põhjus | Kirjeldus |
|-----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Plekid | Ülejäänud puidu toonist eristuvad plekid elementidel võivad viidata hallituse või mädaniku olemasolule. |
| Pikipraad lülipuidus | Radiaalsuunalised paralleelselt pikikiuga lõhed viitavad kuivamisest tulenevatele mahumuutustele. Halva juhuse korral võivad sattuda kinnituselementide kõrvale ja osaliselt või täielikult muuta nende tööskeemi. |
| Lõhenemine | Radiaalsuunalised paralleelselt pikikiuga lõhed, mis läbistavad elemendi kogu ristlõiget. Viitab mahumuutustele ja on konstruktiivsetel põhjustel probleemne. |
| Hallikas toon | Puidu tooni muutumist hallikaks ja kahvatuks põhjustab UV-kiirgus. |
| Paisumine | Niiskussisalduse tõusust või temperatuurimuutustest põhjustatud paisumine võib tekitada lisapingeid ning pragusid liitekohtades. |
| Taimede või sambla kasv elemendil | Viitab piirkonnas puidu püsivale kõrgele niiskussisaldusele. |
| Lahti tulnud kinnituselemendid | Viitab elementide liikumisele ja mahumuutustele. |
| Kooruv värv | Niiskussisaldus puidus on kõrge. |

Hoolduse käigus on äärmiselt oluline silla piirkonnas haljastuse kontrolli all hoidmine. Haljastus ei tohi küündida puitelementideni. Niisamuti ei tohiks kõrgemat haljastust olla vähem kui kahe meetri kaugusel sillast. Kõrge haljastuse olemasolu silla vahetus läheduses pikendab oluliselt kuivamist peale sadu. [5]

Korralise hoolduse käigus on oluline puhastada kõik tasapinnad, elementidevahelised tühimikud ja vuugid mustusest, orgaanikast ning kõigest muust, mis pole otseselt osa sillast. Kuna puitsild on eriti tundlik vee kogunemisele ja orgaanika poolt kohale meelitatud kahjuritele ja seentele, tuleb puhtust ja korrashoidu eriti hoolsalt jälgida. [5] Silla ümbrust peaks korrastama korra aastas. [19]

Puitsildadel ei ole soovitatav teha libedusetõrjet soolaga, kuna see kahjustab mõningal määral puitu. Soola toime sulav vesi imendub puitu ning korduvate külmumistsüklite puhul hakkab sool kogunema puidupooridesse selle pealispinnas. Liigse soolakoguse puhul ning kristallide paisudes võivad poorid lõhkeda ning puit pealispinnalt kahjustuda. Puidu kahjustumisest suurem oht on aga metallist kinnituselementide korrosioon soolade mõjul. Korrodeerunud metallelemendid kahjustavad puitu ning võivad tõsta ka niiskussisaldust. Soolad ei kahjusta puitu, mis on töödeldud õlibaasil vahenditega. [21]

2.4.2 Puitsilda ohustavate seente tuvastamine

Puitsildasid kahjustavaid mädanikke liigitatakse kolme liiki: valgemädanik, pruunmädanik ja pehmemädanik. Need omakorda jagunevad spetsiifilisemalt omaette seente alaliikideks. Mädanikud ründavad puitu toitumise ja selle toel paljunemise eesmärgil. Mädaniku levikut soodustab see, et puidus peab olema sidumata vett.

Valgemädanikku on võimalik tuvastada selle järgi, et puit on lokaalselt heledamat tooni, kraapides pudeneb kergesti laiali ning on pehme ja kiuline. Mädanik lagundab samaaegselt tselluloosi, hemitselluloosi ja ligniini – viimase puudumine põhjustabki iseloomulikke kahjustusi. Lagundamise toime halvenevad tugevusomadused, kusjuures puidu tugevuse muutus on üldjuhul võrdeline massikaoga. [13]

Pruunmädanikku on võimalik tuvastada selle järgi, et puit on tavapärasest tumedamat pruuni tooni. Puidu pind on habras ning lõhestunud justkui kuubikuteks, meenutades söestunud puitu. Pruunmädanik on tõenäoliselt arenenud välja valgemädanikust, kuid selles pole ligniine lõhustavaid ensüüme, mistõttu lagundab see vaid tselluloosi ja hemitselluloosi. Võrreldes teiste mädanikega on pruunmädaniku levikut raskem määrata, kuna seene poolt tekitatud ensüümid võivad olla levinud puidus palju kaugemale, kui see silmaga nähtav on. Samuti on mädanikuga puit happelisem kui terve puit. Pruunmädanik on sagedasem probleem okaspuitudel ning põhjustab teiste mädanikega võrreldes kiiremini tugevusomaduste langust – halvematel juhtudel kaotab puit lausa 75% oma tugevusest. [13]

Pehmemädanik tegutseb ennekõike väga niisketes ning hapnikuvaestes oludes, kus teised mädanikud elada ei saa, ning eelistab madala ligniinisaldusega puiduliike. Mädaniku elutegevus lõhustab peamiselt tselluloosi, vähesel määral ka ligniini. Pehmemädaniku mõjul muutub puit puruliseks ning värvuselt tumehalliks.

Puitkonstruktsioonis olevat seent on aeg-ajalt võimalik märgata juba visuaalsel ülevaatusel. Alati pole see aga võimalik, kuna seent võib olla raske märgata või on ta arenema hakanud elemendi sisemuses – viimase juhtumise tõenäosus võib olla eriti suur näiteks ühenduskohtade juures, kus vesi liigub mööda kinnituselementi otse puidu sisemusse. Teatud katsevahenditega on võimalik määrata ka mädaniku olemasolu elemendi sisemuses mitte-destruktiivsetel meetoditel. Akustiliste katsevahenditega saab saata huvipakkuvates ristlõigetel puitelementi laineid, mille liikumise analüüsimisel on võimalik määrata mädaniku levimise intensiivsust ja ulatust. Paraku on sel meetodil võimalik tuvastada vaid suuremaid mädanikukoldeid, mis moodustavad vähemalt 20% ristlõikest. Lihtsamate meetmetega on võimalik esmast kontrolli teostada, toksides haamri või noaga elementi ning kuuldes õõnsat heli või tundes puidu lokaalset pehmust ning habrast lagunemist. Destruktiivsetel meetoditel on võimalik mädanike olemasolu kindlaks teha, võttes puuraugust proovi või mõõtes puidu vastupanuvõimet spetsiaalse puuriga. Sel viisil tehtud katsete järel tuleb puuritud ava täita ja töödelda kaitsevahenditega. Puidu niiskussisaldust on võimalik mõõta lihtsate meetoditega ning selle määramisel on võimalik teha juba esimesed oletused, kas elementidel esineb mädaniku leviku oht või pigem mitte. [22]

Oluliselt kahjustunud puit tuleks välja vahetada. Olenevalt puidu kahjustusest ja selle ulatusest saab teha lokaalseid parandustöid või tuleb kogu element vahetada. Väiksemate kahjustuste puhul on võimalik kahjustunud osa puidust välja lõigata ja seejärel paigata. Sel juhul tuleb arvestada, et pikikiudu tuleb väljalõigatava osa pikkust suurendada 300 mm mõlemast otsast. Kogu elemendi vahetuse puhul tuleb veenduda, et kahjustatud puiduga kontaktis olnud teised elemendid ei ole samuti kahjustada saanud. Mädanikujärgsete paranduste tegemise eel oleks eelistatud viia taastatava elemendi niiskussisaldus alla 20%. [5]

2.4.3 Puitsilla renoveerimine

Elementide pika ea säilimise eesmärgil peab kaitsevahendeid – asfaldikihte ja puidu kaitsekihte – vajaduse tekkimisel kohe uuendama. Asfaldikihi kahjustuste, lekke-tunnuste ja kahjustatud kaitseelementide puhul tuleb kohe ette näha parandus-meetmed. [5]

Värvitud elemendid vajavad üle värvimist olenevalt kasutatud tootest iga 10-15 aasta tagant, otseste ilmastikumõjude ja päikesekiirguse eest varju jäävatel osadel ligikaudu iga 25 aasta tagant. Parandustöödel peab kasutama eelnevalt kasutatud värvisüsteemi. Kahjustada saanud osad tuleb üle värvida kohe. Puitsildade puhul ei tohi kasutada auru mitte-läbilaskvaid värvisüsteeme, kuna sellisel juhul ei saa niiskunud puit ära kuivada. Sillad tuleks värvida heledamates toonides, kuna tume toon tõmbab ja säilitab rohkem soojust ning kõrgemate temperatuuride tõttu võivad toimuda ulatuslikumad mahumuutused ja pragunemised. [5]

Väiksemaid kahjustusi puitelementides on võimalik parandada mastiksite ja epoksiidvaikudega. Epoksiidvaigud on efektiivsed tühimike täitmiseks, et vesi sisse ei pääseks, ning kasutamiseks kohtades, kus esineb põikjõudusid – normaaljõududesuunaline tugevus on sellel madal. Samuti saab seda injekeerida pragudesse ning liimpuidu lahti löönud lamellide vahele. Epoksiidvaik ei ole sobilik valik elementide parandamiseks, mille niiskussisaldus võib palju muutuda, kuna selle sidumisvõime langeb taolistes oludes. [23]

3 PUIKSILLA PROJEKTEERIMINE

Lõputöö praktilises pooles projekteeritakse kaks puitsilla varianti. Seejuures lähtutakse eurokoodeksite nõuetest rajatiste projekteerimisel. Konstruksioonilahenduse välja töötamisel kasutatakse võtteid, mis tagavad pika puitelementide eluea võrdlemisi lihtsa hooldusrežiimiga. Arvesse on võetud ka kogemusi varem tehtud ebaõnnestunud puitsildade projekteerimisvõtetest ja nende põhjal tehtud targemaid valikuid. Lisaks projektile on välja pakutud ka kokkuvõtte soovituslikest silla ülevaatus- ja parandustegevustest selle eluea jooksul. Projekti raames on projekteeritud silla puitelemendid. Kaldasambad kuuluvad eraldi projekteerimisele.

3.1 Lähteülesanne

Antud töö raames projekteeritakse seoses elamuarenduse rajamisega uus kergliiklussild Laagri keskusesse. Sillaga ületatavaks takistuseks on Pääsküla jõgi. Silla projekteerimiseks vajalikud lähteandmed on võetud praegu kehtivast detailplaneeringust, mis on koostatud Laagri aleviku keskuselale. Sild hakkab ühendama Jõekääru parki ning teisele poole jõge rajatavat arendust.



Joonis 3.1.1 Projekteeritava silla asukoht. Ekraanipilt Maa-ameti kodulehelt.

3.2 Olemasolev olukord

Praegu on piirkonnas võimalik Pääsküla jõge ületada autoga Veskitammi tänava sillalt ning kergliiklejal autotee kõrval asetsevalt sillalt või pargis olevalt sillalt. Pargis olemasolev sild on pilkupüüdva väljanägemisega ning sellest tulenevalt peaks ka projekteeritaval sillal rõhku panema arhitektuurile. Olemasolev sild on rajatud teraskanduritele, sellel on punased teraspiirded ning musta värvi valgustusega erikujulised portaalid.



Joonis 3.2.1 Olemasolev kergliiklejate sild projekteeritava silla läheduses. Erakogu.

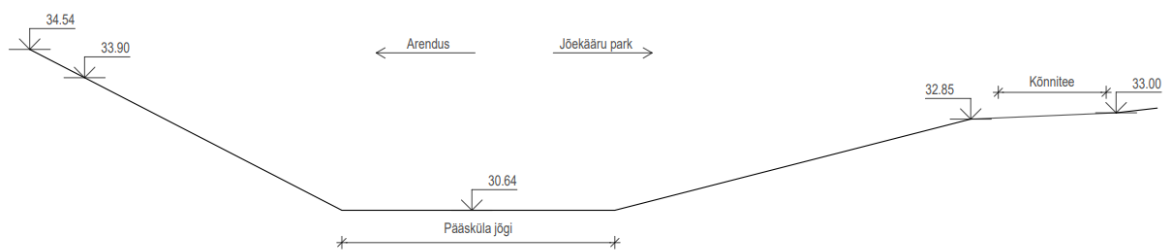
Pargipoolsel kaldal on planeeritava silla läheduses kiikpingiga puhkeala ning selle kõrval killustiku ja sõelmetega kaetud jalgtee. Jõe laius piirkonnas on umbes 7 meetrit. Vastaskaldal asub aiaga piiratud maatükk, aia kõrvalt kulgeb sissekõnnitud rada. Kummalgi pool jõge asuvad kaldad on suurte kõrgusvahedega – kõrguste erinevus on ligikaudu 1,5 meetrit.



Joonis 3.2.2 Vasakul planeeritava arendusega kallas, paremal Jõekäär park. Erakogu.



Joonis 3.2.3 Vaade pargipoolselt kaldalt planeeritava silla pikitelje suunas. Erakogu.



Joonis 3.2.4 Maapinna vertikaal planeeritava silla pikiteljel.

3.3 Projekteerimise piiritlus

Projekteerimise lähteülesanne on püstitatud detailplaneeringu alusel. Detailplaneeringust on võetud sillale esmased mõõdud, mis on dimensioneerimise käigus korrigeeritud sobivateks. Detailplaneeringu alusel on silla-ala maksimaalseteks mõõtudeks ette nähtud pikkus 30,6 meetrit ning laius 4 meetrit.

Silla puitelemendid on projekteeritud vastavalt standardile EVS-EN 1995:1 ja EVS-EN 1995:2. Sild on projekteeritud liikluskoormustele, mis on kooskõlas standardiga EVS-EN 1991:2. Silla puitelemendid on kontrollitud kandepiirseisundile (ULS) ja kasutuspiirseisundile (SLS). Projekteerimise raames on antud staadiumis paika pandud ilmastiku suhtes püsiva silla lahendus ning arvutustega näidatud põhimõttelise lahenduse teostatavus ka ehitismehaanilises mõttes.

Kergliiklussild on projekteeritud koormusmodelile LM4 ning kuna sillale pääs ei ole takistatud, on arvestatud ka teenindusveoki olemasoluga sillal [24]:

- $q_k = 5 \text{ kN/m}^2$
- $Q_{serv,1} = 80 \text{ kN}$
- $Q_{serv,2} = 40 \text{ kN}$

Sisejõudude arvutamiseks kasutatavad varutegurid [24]:

- $\gamma_q = 1,35$
- $\gamma_g = 1,35$

Sillatüübid, millele lõplikku projekti koostada, valiti, kaaludes koormuste iseloomu ning ava pikkust. Samuti kaalutleti valikuid majandusliku mõttekuse seisukohalt – lõpptulemus peab ümbritsevas keskkonnas hea välja nägema, kuid ebamõistlikult suuri kulutusi, mis võiksid ehituseelarvet oluliselt tõsta, pole mõistlik teha. Tulenevalt võrdlemisi väikesest avapikkusest ei olnud piisavat põhjust ripp silla või vantsilla rajamiseks. Samuti välistasid lühike avapikkus ja teadaolevad geoloogilised tingimused kaarsilla. Lõplikuks valikuks jäid talasild ning sõrestiksild. Mõlemad sillad on võimalik ning soovitatav tehases valmistada ning valmistootena objektile tarnida, lühendades kohapeal ehitustegevuse aega oluliselt ning tagades oluliselt parema ehituskvaliteedi tänu ehituse jooksul kontrollitud keskkonnatingimustele.

Arvestades ümbritsevat keskkonda ja olemasolevat läheduses asetsevat kergliiklussilda tuleb paika seada nõuded silla välimusele. Pargis kulgevad jalgrajad on kruusa-sõelmete segused ning ümberringi on muruplatsid, olemasolev sild on kaetud 300x300 mm tänavaplaatidega. Kuigi konstruktiivse kaitse tagamise seisukohalt oleks asfaldiga kaetud sild hea valik, siis antud juhul ei sobiks selline lahendus keskkonda ning sillale kavandatakse puitlaudisest kate. Puitlaudisest kate vähendab oluliselt sillale mõjuvaid omakaalukoormusi. Kuna projekteeritav sild on looduslikuma loomuga inimkeskkonnas, siis välistatakse puidukaitsevahendina raskete ja inimestele ohtlike kemikaalide – nagu näiteks kreosoot ja CCA – kasutamine. Puitelemendid töödeldakse ning värvitakse mahedates ja heledates ümbrusega kooskõlas olevates toonides nagu näiteks helekollane.

Puitmaterjali valikul lähtutakse sellest, mis on kohalikul turul kättesaadav. Kuna sildade puhul on vaja kasutada materjale, mis tagavad projektse eluea mõistlike kulutuste piires, tuleb valida heade kohalike puusortide vahel. Eestis on kõige levinumad puusordid mänd (30,5%), kask (25,8%) ja kuusk (22,7%). [25] Ehitusmaterjalidena on enim levinud mänd ja kuusk, kasest võib üldjuhul leida vaid laudasidja vineeri. Kask on võrreldes eeltoodud okaspuitudega vähese vaigusisaldusega ning mädaneb kergesti. Standardikohaselt kasutatakse männil ja kuusel samasuguseid tugevusnäitajaid, kuigi tegelikkuses on mänd mõnevõrra tugevam kui kuusk. Kuusk ja mänd on vaigurohked ning väga heade looduslike kaitseomadustega kahjurite vastu, mänd siiski mõnevõrra rohkem. Samuti on kuusk omapärase rakustruktuuriga ning süvaimmutamisel tungib kaitsevahend kuuse sisse vaid mõned millimeetrid. Männipuidust elementi saab aga probleemideta sügavuti immutada. [10] Sellest tulenevalt valitakse antud silla projekteerimisel kõigi puitelementide materjaliks mänd. Eesti turul toodete piiratud kättesaadavusest tulenevalt on kõik saematerjalist elemendid tugevusklassiga C24.

Projektis kasutatavad põhilised puidukaitse meetodid on keemilised kaitsevahendid, kalletega vee ära juhtimine ning elementide katmine plekist plaatidega. Kõik puitelemendid töödeldakse ACQ-ga ehk kvarternaarsete ammooniumsooladega vaselahusega. Enne kaitsevahendiga immutamist peavad puitelemendid olema kuivatatud nii, et nende maksimaalne niiskussisaldus on 28%. [26] Kõik ettepuuritud avad ja muud sisselõiked peavad olema tehtud juba enne kaitsevahendiga töötlemist – vaid sel viisil on keemiline töötlus ka efektiivne.

3.4 Talasilla projekteerimine

Talasild on väga levinud tüüp puitsildade seas. Korraliku hüdroisolatsioonikihiga ja asfaldiga kaetud puidust talasild on odav lahendus ja pika potentsiaalse elueaga, kuna kandev konstruktsioon on keskkonnamõjude eest hästi kaitstud. Talasildade probleemiks on ruumivajadus kõrgete talade jaoks. Samuti on vaja suuremat sillaalust kõrgusgabriiti selleks, et tagada puitelementide ning maapinna ja haljastuse vahel ohutu vahemaa.

Talasilla projekteerimine hõlmab antud lõputöö raames välimuse paika panemist, puitelementide valimist ning konstruktiivselt vaatepunktist tähtsate detailide jaoks lahenduste väljatöötamist. Arvutustega näidatakse, et loodud silla kontseptsioon on ka kandevõime seisukohast täiesti toimiv.

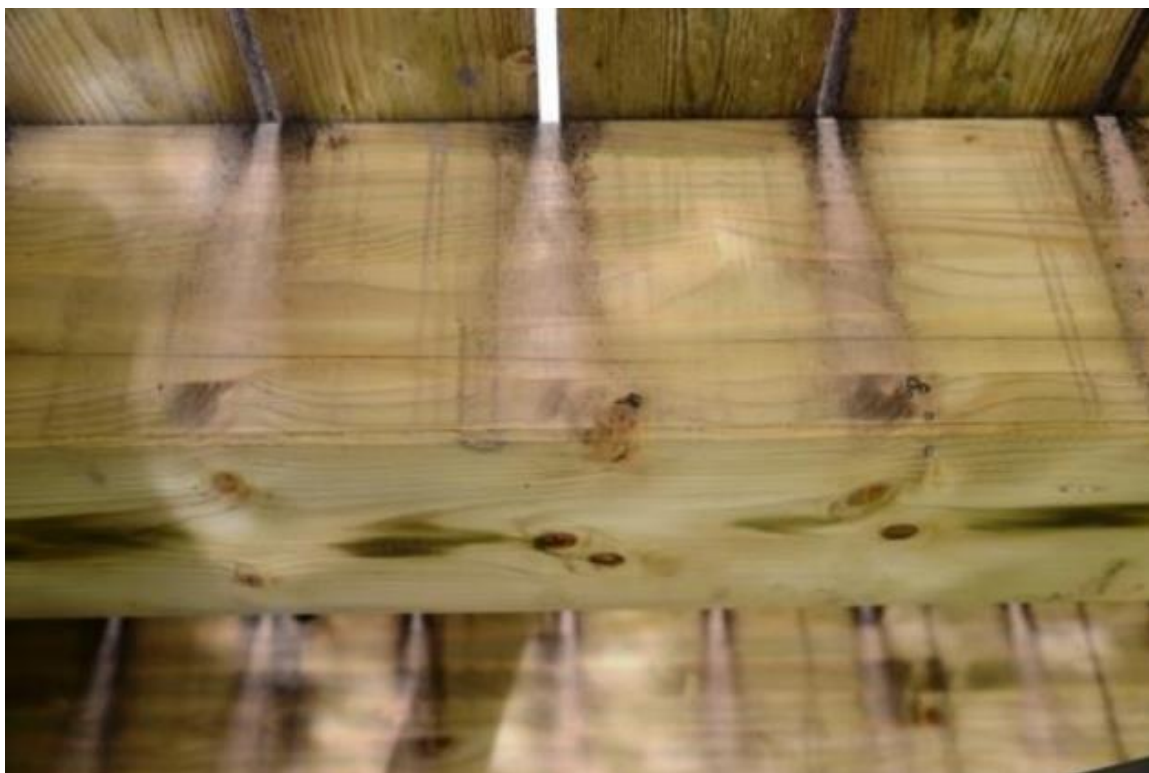
3.4.1 Kontseptsiooni paika seadmine

Antud silla projekteerimisel alustati ligikaudse ava pikkuse ja tala kõrguse paika panemisest. Lisaks on arvestatud, et toepiirkonna ja maapinna vahele jääks vähemalt 0,5 meetrit vaba ruumi. Antud olukorras on jõe kõrgusmärk piisavalt madalal, et silla ja veepinna vaheline vaba ruum oleks probleemideta tagatud. Kuna sillaava pikkus on liiga suur selleks, et standardmõõdus kättesaadavad puitprussid koormustele nõuetekohaselt vastu peaks, otsustati Eestis kõige laiemalt levinud GL28h liimpuittalade kasuks. Et silla kogukõrgust veidi madalamaks tuua ning piirduda standardlaiuses kättesaadavate taladega, valiti silda kandma kolm peatala sammuga 1,2 meetrit.

Enne sillaelementide dimensioneerimist seati paika ligikaudne silla lahendus ja talade mõõdud. Selle eesmärgiks oli leida parimad konstruktiivsed lahendused silla ilmastikukindluse tagamiseks. Lisaks konstruktiivsetele kaitsemeetoditele on kõik puitelemendid immutatud keemilise kaitsevahendiga, mis on toonitud pruuniks.

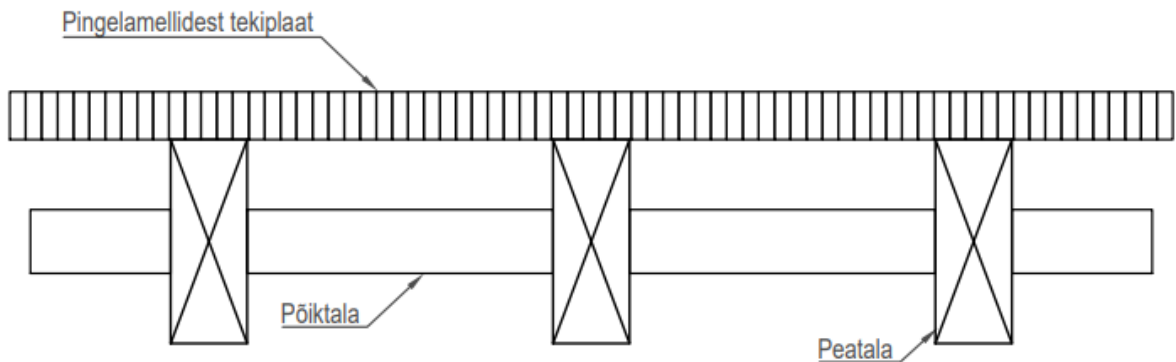
Projekteeritava silla ilmastikukindluse tagamise teeb keeruliseks asjaolu, et tekiehitus koosneb üksikutest laudadest ning kandvate elementide kaitseks vihma ja koguneva mustuse eest tuleb kasutada teistsuguseid võtteid. Elementide ilmastikukindluse peaks tagama võimalikult lihtsate võtetega ning väheste elementide arvuga, kuna erinevate elementide suur arvukus ja keerukad süsteemid tõstavad kahjustuste riski. Laias laastus oleks sellise probleemi lahendamiseks kaks võimalust – kas tekitada täiesti veetihe

vahekiht tekiehituse ja kandva konstruktsiooni vahele või katta olulisi elemente lokaalselt.



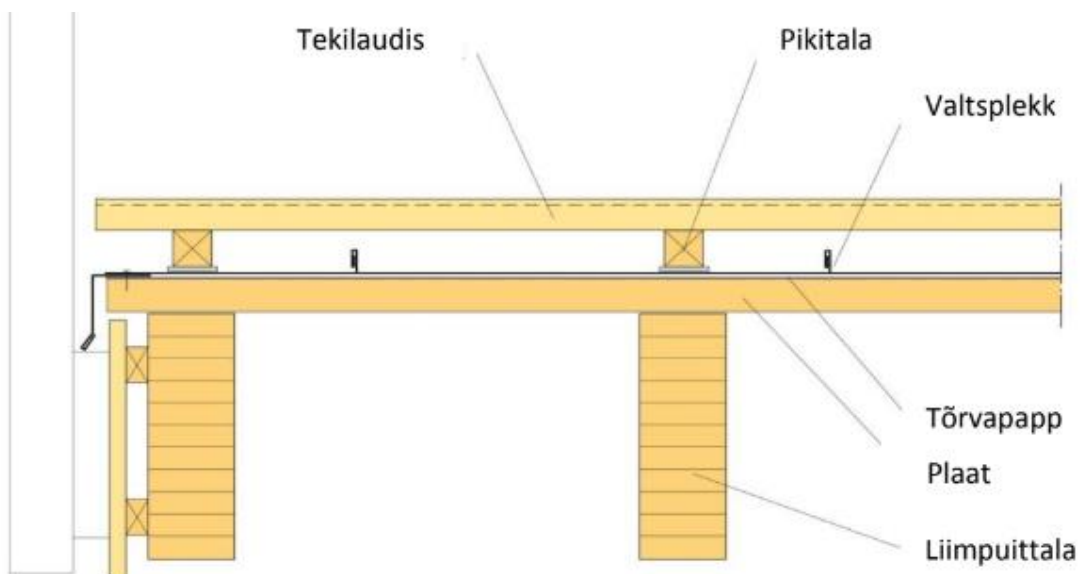
Joonis 3.4.1.1 Talad, mis pole teki pealt tuleva vihmavee eest otseselt kaitstud. [21]

Selleks, et tekiehitus oleks puidust ning hea välimusega, kuid tekialune põhiline kandevkonstruktsioon oleks siiski täielikult kaitstud, on mitmeid võimalusi. Laialt levinud võtte on tekk ehitada pingelamellplaadist või naelutatud lamellplaatidest – sellist lahendust kasutatakse põhjamaades laialt ka talasildade katmisel ning selle kaitsevõime on küllaltki hea. Nii Eestis kui ka Rootsis tehtud sillaülevaatuste tulemused on näidanud, et korralikult konstrueeritud immutatud prussidest plaat suudab edukalt kaitsta peatalasid. Kuigi lamellplaadist tekiehitus oleks hea valik, pole antud projektis sellise lahenduse kasutamine otstarbekas, kuna see annaks juurde palju omakaalu ning kergliiklussillal olevate väikeste koormuste ning võrdlemisi väikese avapikkuse tõttu poleks sellise lahenduse kasutamine vajalik. Lamellplaatidest tekiehitust kasutatakse palju autoliiklusega sildadel.



Joonis 3.4.1.2 Lamellidest koosnev sillateki võimalus antud projekti jaoks.

Hoonete ehitusest tuttava lahendusena on teada, et laudkatus, kus lauad asetsevad väikese ülekattega kahes kihis üksteise peal, on kestev ja traditsiooniline lahendus. Paraku on laudkatuste puhul soovitatav minimaalne kalle 45° selleks, et vihmavesi ära saaks voolata ja kahjustusi ei tekitaks ning sel põhjusel pole sellist lahendust võimalik silla tekiehituses kasutada. [27] Üks juhendites soovitatav lahendus on toodud joonisel nr 3.4.1.3, kus tekiehitust toetavate talade ja kandva konstruktsiooni vahele on tehtud tõrvapapi ja valtsplekiga kaetud plaat, mis peaks peatalasid kaitsma vihma ja vee kogunemise eest. Antud projektis sellist lahendust ei kasutata, kuna piisavalt hea kaitse on võimalik tagada ka lihtsamate meetoditega. Samuti tekitab tõrvapapp soodsa keskkonna kahjustuste tekkeks, kui see siiski peaks pikaajalisemalt niiskuma ning kondensaat mitte välja kuivama.



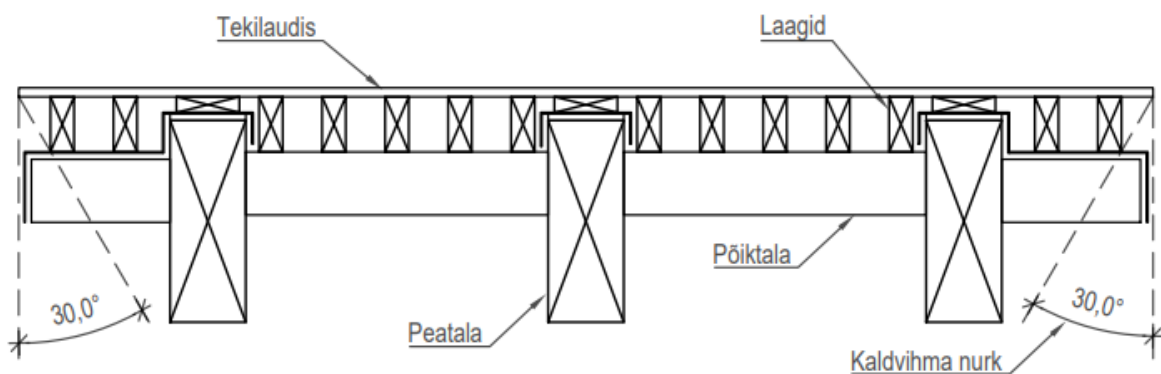
Joonis 3.4.1.3 Tõrvapapi ja valtsplekiga kaitstud talad [21]

Lokaalse lahendusena on võimalik puitelemente ka üksikult katta. Võimalik oleks peatalasid katta liimuva veekindla membraaniga. Kuna aga sellised membraanid on

täiesti veetihedad, võib tekkida probleeme puitelemendist niiskuse välja kuivamisega. Laialt levinud lahendus on elementide katmine plekiga. Käesolevas projektis on peatalade kaitse vee eest tagatud 1-millimeetriste vasklehtedega, mis on tuulutuse tagamiseks paigaldatud 20 mm paksustele lattidele. Kate on kinnitatud lattide külge küljelt 20 mm pikkuste puidukruvidega. Jooniselt nr 3.4.1.5 on näha, et tekiehitus ulatub piisavalt kaugemale, et kaitsta peatalasid 30° nurga all sadava kaldvihma eest ning seega pole talasid külgedelt vaja katta.



Joonis 3.4.1.4 Veekindla membraaniga kaetud talad. Foto autor: MFM Building Products.



Joonis 3.4.1.5 Ristlõikes skeem lõplikust talasillast.

Silda kannavad kolm liimpuidust peatala mõõtudega 680x240 mm ning kogupikkusega 15 meetrit. Liimpuittalade mõõdud on valitud Eesti tootjate piirangutest tulenevalt – maksimaalne tala laius saab olla 240 mm ning tala kõrgust saab muuta lamellide kaupa,

mis on 20 või 40 mm kõrged. Liimpuittalad töödeldakse puidukaitsevahendiga kahes staadiumis. Esmalt immutatakse üksikud lamellid. Seejärel kuivatatakse need, kuni puidu niiskussisaldus on alla 20% ja liimitakse omavahel kokku valmistalaks. Kuivamisjärgselt puuritakse talasse kõik vajalikud augud ja lõigatakse süvised ning peale lõpptoodangu valmimist immutatakse tala veelkord kaitsevahendis. Liimpuittala on efektiivselt kaitsevahendiga töödeldud vaid juhul, kui see on kirjeldatud viisil kahekordselt immutatud.

Peatalade vahel asetsevad põiksuunas immutatud prussid mõõtudega 200x100 mm, sammuga 2100 mm. Põiktalade ülesanne on pakkuda peataladevahelist stabiilsust ning toetada laage, mille peale rajatakse tekiehitus. Vee äravoolu põiktaladelt tagab silla 4% pikikalle. Põiktala ühenduskohad nii peatala kui ka laagidega on seisva vee eest kaitstud. Puitsildadel on levinud viga väljaulatuvate puidust osade kaitse puudumine või siis valede kaitsemeetodite valimine. Kõige enam levinud kahjustusteks sellisel juhul on lõhenenud otsad, sammaldumine või mädaniku teke.

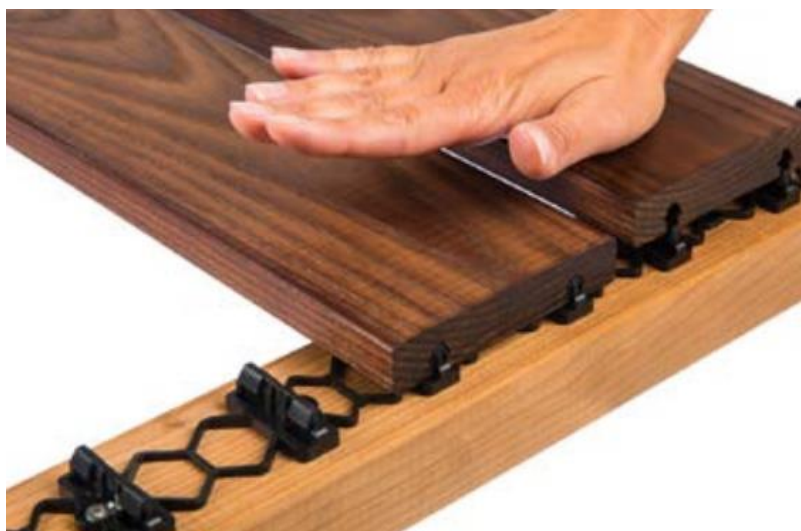


Joonis 3.4.1.6 Vasakul tuulutuspõiksuunaga metallist kate, [23] paremal katmata kahjustunud põiktala [21].

Tekiehitust toetavad laagid on immutatud puitprussid mõõtudega 175x75 mm, 200-millimeetrise sammuga. Erisus esineb peatalade kohal, kus kasutatakse laiemaid, 50x200 mõõdus prusse. Laiemat prussi kasutatakse, kuna laagid peavad asetsema piisavalt tihedalt, et teenindusveoki ratta koormus langeks igal juhul otse laagile, mitte vaid lauale. Peatala kohal kahe laagi kasutamine võib tekitada aga olukorra, kus laudade vahelt sadanud vihmaveel pole võimalust konstruktsioonist eemaldumiseks ning see jääks kahe laagi vahele püsima.

Tekiehituses kasutatav laud on immutatud pruuni vasklahusega (näiteks Tanatone™). Lauad on mõõtudega 28x118x3600 mm. Laudade pealne ning alumine pind peavad olema rihveldatud, et tekitada soodsamad tingimused tuulutuseks ning liiklejatele parem püsivus libedates oludes. Tekiehituseks sobiks väga hästi ka lehis, mis on kõrge vaigusisaldusega ning isegi immutamata kujul pika kestvusega. Kuna aga Eesti turul on lehisest laud ligi kolm korda kallimad kui männist või kuusest, siis pole mõistlik seda antud projektis kasutada. Tekiehituseks kaaluti ka valmis terrassilaudade süsteemi kasutamist, kuna need on ilmastikukindluse aspektist hea lahendusega – terrassilaua alumisel küljel kulgevad sooned, kuhu kinnituvad klambrid. Klamber asetseb vihma eest kaitstuna terrassilaua all. Samuti ei ole sel viisil fikseeritud laudade ülapinnas kinnitusvahendeid, mille jaoks puuritud aukude läbi saaks vesi konstruktsiooni pääseda. Klambritega süsteem on ligikaudu viis korda kallim lahendus, kui tavapäraselt kruvidega kinnitatud immutatud laud ning seetõttu ei õigusta see end antud projekti raames majanduslikult.

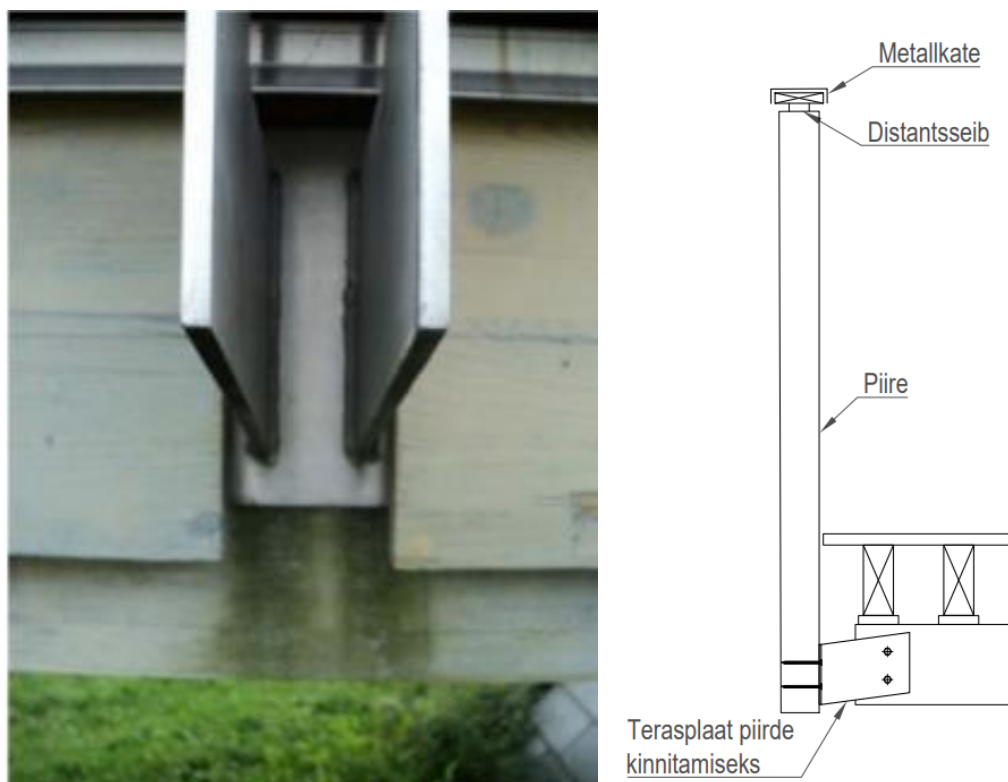
Lauad kinnitatakse laagidesse roostevabast terasest puidukruvidega. Kruviaugud peavad olema ettepuuritud suurusega $0,7*d$, kus d on kruvi läbimõõt [28]. Kruvisid ei tohi süvistada liiga sügavale ning kruvipead peavad olema tasapinnas lauaga – vastasel korral hakkab aukudesse kogunema vihmavesi. Männipuidust laud tuleb paigaldada viisil, et puusüdamik jääks alapinda.



Joonis 3.4.1.7 Alumiselt küljelt klambritega kinnituv terrassilaud. Foto autor: Thermory AS.

Sillale nähakse ette puidust piirded, mille üks võimalik lahendus on toodud ka projekti joonistes. Piirdepaneelid kinnituvad sillale 2,1-meetrise sammuga põiktalade külge. Piirete projekteerimisel on oluline läbi mõelda nende paigutus, et ei tekiks piirkondi, kus mustus ja vesi saaksid koguneda. Puitsildade levinud viga on piirete ehitusele mitte

niivõrd suure tähelepanu pööramine ja sellest tulenevalt leiab vesi tee kandvate elementideni. Joonisel nr 3.4.1.8 on toodud välja ühele puitsillale tehtud piirdelahendus, mis ei takista vee voolamist kandvale konstruktsioonile ning võrdluseks antud projektile välja mõeldud lahendus, mis takistab vee voolu piirdelt taladele.



Joonis 3.4.1.8 Vasakul vett kandvale talale suunav piirde kinnitus [5]. Paremal projekteeritud vett ära juhtiv piirde kinnitus.

Toepiirkonnas on oluline tagada vee ära juhtimine puitelementide lähedusest ning takistada mustuse kogunemist. Puitelemendid on fikseeritud terasest tugiosale, mis omakorda on ankurdatud raudbetoonist patja kaldasambal. Terasest tugiosale on paigaldatud 20 mm paksune neopreenmatt, millele toetub otse peala. Puitelemendi ja betoonist tugiosa vahel on oluline anda veidi kõrguslikku vahet, et mitte tekitada mustuse kogunemiseks soodsat pilu ning et vaba vesi betoonist puitelementi ei imbuks. Puidust postide toetamine otse betoonile on viga, mida on tehtud nii Eesti kui ka Põhjamaade sillaehituses ning ülevaatuste käigus on ilmnunud, et sellistes piirkondades on puit tugevalt kahjustatud ning niiskussisaldus üle normide. Toepiirkonnas on peatala plekk-kattega kaitstud suuremal määral. Tekiehitusel kinnitatakse viimaste laudade külge kogu silla laiuses plekkliist, mis painutatakse alla peatala otsasid katma.

Projekteeritud talasild on 15 meetrit pikk, arvutusliku avaga 14,7 meetrit. Liigeldava ala laius on 3,6 meetrit, üldgabariit on 3,9 meetrit. Tulenevalt kallaste suurest kõrguste vahest tuleb sillale anda võimalikult suur pikikalle. Nõuetekohaselt võib projekteerimise lähtetaseme "hea" korral olla maksimaalne pikikalle 5%. [29] Talasilla puhul valitakse maksimaalseks pikikaldeks 4%.

3.4.2 Kandevõime kontroll

Talasilla kandevkonstruktsiooni elementide dimensioneerimisel otsustatakse kõige ebasoodsam koormusskeem iga elemendi jaoks eraldi ning leitakse sellele vastavad sisejõud. Projekteeritav talasild koosneb GL28h tugevusklassi liimpuittaladest ning C24 tugevusklassi saematerjalist. Nendele klassidele vastavad normatiivsed tugevus- ja jäikusnäitajad on määratletud standardiga EVS-EN 14080:2013 ning toodud välja tabelis nr 3.4.2.1.

Puitelementide arvutuslike tugevusnäitajate arvutamisel tuleb arvestada materjali osavaruteguriga γ_M ja näitajaga $k_{mod,t}$, mis võtab arvesse puitelemendile mõjuvaid ilmastikutingimusi ning koormuste iseloomu.

Tabel 3.4.2.1 Lamell-liimpuidu ja saematerjali normatiivsed näitajad.

| Omadus | Tähis | GL28h [30] | C24 [31] |
|-----------------------------------|--------------|------------|----------|
| Paindetugevus, N/mm ² | $f_{m,k}$ | 28,0 | 24,0 |
| Tõmbetugevus, N/mm ² | $f_{t,0,k}$ | 22,3 | 14,5 |
| | $f_{t,90,k}$ | 0,5 | 0,4 |
| Survetugevus, N/mm ² | $f_{c,0,k}$ | 28,0 | 21,0 |
| | $f_{c,90,k}$ | 2,5 | 2,5 |
| Nihketugevus, N/mm ² | $f_{v,k}$ | 3,5 | 4,0 |
| Tihedus, kg/m ³ | ρ_k | 425 | 350 |
| Elastsusmoodul, N/mm ² | $E_{0,05}$ | 10500 | 7400 |
| Nihkemoodul, N/mm ² | $G_{g,05}$ | 540 | - |
| Nihkemoodul, N/mm ² | G_{mean} | - | 690 |

Puitelementide arvutuslike tugevusnäitajate arvutamisel tuleb arvestada materjali osavaruteguriga γ_M ja näitajaga $k_{mod,t}$, mis võtab arvesse puitelemendile mõjuvaid ilmastikutingimusi, materjali ning koormuste iseloomu. Kasutusklassi kirjeldused on toodud standardis EVS-EN 335:2013. Sildade puhul loetakse kasutusklassi 2 alla elemendid, mis on kaitstud otseste ilmastikumõjude eest näiteks metallkatete ja vooderdustega või asetsevad kaldvihma eest kaitstult tekiehituse all. Kasutusklassi 3 alla kuuluvad puitelemendid, mis pole ilmastikumõjude eest kuidagi kaitstud, kuid pole

samas ka otseses kontaktis vee või maapinnaga. Koormused jagunevad standardi alusel viite klassi [28] Sildade puhul arvestatakse omakaalukoormused kestusklassi "alalised koormused" ning liikluskoormused kestusklassi "lühiajalised koormused". Juhul, kui konstruktsioonile rakenduvad mitu erinevat koormuste kestusklassi samaaegselt, valitakse k_{mod} lühema kestusega koormuse kestusklassi järgi. Antud projekti raames kasutatavad osavarutegurid ja teguri k_{mod} väärtused on toodud tabelites 3.4.2.2 ja 3.4.2.3.

Tabel 3.4.2.2 Teguri k_{mod} väärtused. [30]

| Kirjeldus | k_{mod} väärtus |
|-------------------------------|-------------------|
| II kasutusklass, lühiajaline | 0,9 |
| III kasutusklass, lühiajaline | 0,7 |

Tabel 3.4.2.3 Osavarutegurite γ_M väärtused. [32]

| Kirjeldus | γ_M väärtus |
|-------------|--------------------|
| Saematerjal | 1,3 |
| Liimpuit | 1,25 |
| Liited | 1,3 |

Tugevuskontrollide teostamiseks arvutatakse välja arvutuslikud tugevusnäitajad valemite põhjal:

$$f_{m,d} = \frac{k_{mod} * f_{m,g,k}}{\gamma_M} \quad (3.4.2.1)$$

$$f_{t,0,d} = \frac{k_{mod} * f_{t,0,k}}{\gamma_M} \quad (3.4.2.2)$$

$$f_{t,90,d} = \frac{k_{mod} * f_{t,90,k}}{\gamma_M} \quad (3.4.2.3)$$

$$f_{c,0,d} = \frac{k_{mod} * f_{c,0,k}}{\gamma_M} \quad (3.4.2.4)$$

$$f_{c,90,d} = \frac{k_{mod} * f_{c,90,k}}{\gamma_M} \quad (3.4.2.5)$$

$$f_{v,d} = \frac{k_{mod} * f_{v,g,k}}{\gamma_M} \quad (3.4.2.6)$$

Tabel 3.4.2.4 Arvutuslikud tugevusomadused 2. ja 3. kasutusklassi liimpuit-elementidele.

| Tähis | 2. kasutusklass | 3. kasutusklass |
|----------------------------------|-----------------|-----------------|
| $f_{m,g,d}$, N/mm ² | 20,2 | 15,7 |
| $f_{t,0,d}$, N/mm ² | 16,1 | 12,5 |
| $f_{t,90,d}$, N/mm ² | 0,4 | 0,3 |
| $f_{c,0,d}$, N/mm ² | 20,2 | 15,7 |
| $f_{c,90,d}$, N/mm ² | 1,8 | 1,4 |
| $f_{v,g,d}$, N/mm ² | 2,5 | 2,0 |

Tabel 3.4.2.5 Arvutuslikud tugevusomadused 2. ja 3. kasutusklassi saematerjalile.

| Tähis | 2. kasutusklass | 3. kasutusklass |
|----------------------------------|-----------------|-----------------|
| $f_{m,d}$, N/mm ² | 16,6 | 12,9 |
| $f_{t,0,d}$, N/mm ² | 10,0 | 7,8 |
| $f_{t,90,d}$, N/mm ² | 0,3 | 0,2 |
| $f_{c,0,d}$, N/mm ² | 14,5 | 11,3 |
| $f_{c,90,d}$, N/mm ² | 1,7 | 1,3 |
| $f_{v,d}$, N/mm ² | 2,8 | 2,2 |

Peatala kontroll:

Tabel 3.4.2.6 Peatala karakteristikud

| Tähis | Väärtus |
|-----------------------------|---------------------|
| b , mm | 240 |
| h , mm | 680 |
| l_{tugi} , mm | 300 |
| A , mm | 163×10^3 |
| A_{ef} , mm ² | $109,3 \times 10^3$ |
| l_{ef} , mm | 13500 |
| W_y , mm ³ | $18,5 \times 10^6$ |
| I_y , mm ⁴ | $6,3 \times 10^9$ |
| I_z , mm ⁴ | $783,4 \times 10^6$ |
| I_{tor} , mm ⁴ | $2,4 \times 10^9$ |

Paindekandevõime

Peatalale on kõige ebasoodsam koormusolukord teenindusveoki viibimine silla keskel.

Peatalale mõjuv paindemoment $M_{Ed} = 294,5$ kNm.

$$\sigma_{m,d} = \frac{M_{Ed}}{W_y} \quad (3.4.2.7)$$

Kus M_{Ed} – arvutuslik paindemoment, kNm

W_y – ristlõike tugevusmoment peatelje suhtes, mm³

$$\sigma_{m,d} = \frac{294,5 \cdot 10^6}{18,5 \cdot 10^6} = 15,9 \text{ N/mm}^2 \quad (3.4.2.7)$$

$$\sigma_{m,d} = 15,9 \text{ N/mm}^2 < f_{m,d} = 20,2 \text{ N/mm}^2$$

Tugevustingimus on täidetud.

Nihkekandevõime

Peatala nihet kontrollitakse toepiirkonnas, kohttoel olevana. Suurimat nihet tekitav põikjõud on 8-tonnine teenindusveoki telg. Peatalale mõjuv põikjõud $Q_{Ed} = 79,8$ kN.

$$\tau_d = \frac{3 \cdot Q}{2 \cdot A_{ef}} \quad (3.4.2.8)$$

Kus Q – on põikjõud, kN

A_{ef} – efektiivne ristlõike pindala, mm²

$$\tau_d = \frac{3 * 79,8 * 10^3}{2 * 109,3 * 10^3} = 1,1 \text{ N/mm}^2 \quad (3.4.2.8)$$

$$\tau_d = 1,1 \text{ N/mm}^2 < f_{v,d} = 2,5 \text{ N/mm}^2$$

Tugevustingimus on täidetud.

Survetugevus ristikiudu

Peatala tugevust survele ristikiudu kontrollitakse toepiirkonnas. Peatalale mõjuv survejõud on $V_{Ed} = 79,8 \text{ kN}$.

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{F_{c,90,d}}{A_{ef}} \quad (3.4.2.9)$$

Kus $F_{c,90,d}$ – arvutusliku survejõud ristikiudu, kN

A_{ef} – efektiivne ristlõike pindala, mm^2

$$A_{ef} = l_{tugi} * b_{ef} \quad (3.4.2.10)$$

Kus l_{tugi} – toepiirkonna pikkus, mm

b – ristlõike laius, mm

$$A_{ef} = 300 * 240 = 72 * 10^3 \text{ mm}^2 \quad (3.4.2.10)$$

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{79,8 * 10^3}{72 * 10^3} = 1,1 \text{ N/mm}^2 \quad (3.4.2.9)$$

$$\sigma_{c,90,d} = 1,1 \text{ N/mm}^2 < k_{c,90} * f_{c,90,d} = 1,75 * 1,8 = 3,2 \text{ N/mm}^2$$

Tugevustingimus on täidetud.

Stabiilsuskontroll

Peatala kontrollitakse stabiilsusele, et määrata põiktalade vajalikkus. Kõige ebasoodsam koormusolukord on teenindusveoki viibimine silla keskel. Peatalale mõjuv paindemoment $M_{Ed} = 294,5 \text{ kNm}$.

Kriitiline paindepinge $\sigma_{m,crit}$ leitakse klassikalise stabiilsusteooria järgi:

$$\sigma_{m,crit} = \frac{M_{y,crit}}{W_y} \quad (3.4.2.11)$$

Kus $M_{y,crit}$ – kriitilist paindepinget põhjustav paindemoment, kNm

W_y – ristlõike tugevusmoment peatelje suhtes, mm^3

$$M_{crit} = \frac{\pi * \sqrt{E_{0,05} * I_z * G_{0,05} * I_{tor}}}{l_{ef}} \quad (3.4.2.12)$$

Kus $E_{0,05}$ – elastsusmooduli 5-protsentiili väärtus pikikiudu, N/mm^2

I_z – Inertsimoment z-telje suhtes, mm^4

$G_{0,05}$ – nihkemooduli 5-protsentiili väärtus pikikiudu, N/mm^2

I_{tor} – väändeinertsimoment, mm^4

l_{ef} – tala efektiivne pikkus, mm

$$M_{crit} = \frac{\pi * \sqrt{10500 * 783,4 * 10^6 * 540 * 2,4 * 10^9}}{13500} = 759,8 \text{ kNm} \quad (3.4.2.12)$$

$$\sigma_{m,crit} = \frac{759,8 * 10^6}{18,5 * 10^6} = 41,1 \text{ N/mm}^2 \quad (3.4.2.11)$$

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} \quad (3.4.2.13)$$

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{28}{41,1}} = 0,83 \quad (3.4.2.13)$$

$$k_{crit} = \begin{cases} 1 & \text{kui } \lambda_{rel,m} \leq 0,75 \\ 1,56 - 0,75 * \lambda_{rel,m} & \text{kui } 0,75 < \lambda_{rel,m} \leq 1,4 \\ \frac{1}{\lambda_{rel,m}^2} & \text{kui } 1,4 < \lambda_{rel,m} \end{cases} \quad (3.4.2.14)$$

$$k_{crit} = 1,56 - 0,75 * 0,83 = 0,938 \quad (3.4.2.14)$$

$$\sigma_{m,d} = 15,9 \text{ N/mm}^2 < k_{crit} * f_{m,d} = 0,938 * 20,2 = 18,9 \text{ N/mm}^2$$

Tugevustingimus on täidetud.

Põiktala kontroll:

Tabel 3.4.2.7 Põiktala karakteristikud.

| Tähis | Väärtus |
|-------------------------|--------------------|
| b , mm | 150 |
| h , mm | 200 |
| A , mm ² | 30×10^3 |
| W_y , mm ³ | 1000×10^3 |

Paindekandevõime

Põiktalale kõige ebasoodsam koormusolukord on teenindusveeki ratta viibimine konsoolse tala otsas. Põiktalale mõjuv paindemoment $M_{Ed} = 6,3 \text{ kNm}$.

$$\sigma_{m,d} = \frac{6,3 * 10^6}{1000 * 10^3} = 6,3 \text{ N/mm}^2 \quad (3.4.2.7)$$

$$\sigma_{m,d} = 6,3 \text{ N/mm}^2 < f_{m,d} = 16,6 \text{ N/mm}^2$$

Tugevustingimus on täidetud.

Nihkekandevõime

Põiktalale on kõige ebasoodsam koormusolukord teenindusveeki ratta viibimine mõlemast otsast kinnitatud tala keskel. Põiktalale mõjuv põikjõud $Q_{Ed} = 13,6 \text{ kN}$.

$$\tau_d = \frac{3 * 13,6 * 10^3}{2 * 30 * 10^3} = 0,7 \text{ N/mm}^2 \quad (3.4.2.8)$$

$$\tau_d = 0,7 \text{ N/mm}^2 < f_{v,d} = 2,2 \text{ N/mm}^2$$

Tugevustingimus on täidetud.

Laagi kontroll:

Tabel 3.4.2.8 Laagide karakteristikud.

| Tähis | Väärtus |
|----------------------------|---------------------|
| b , mm | 100 |
| h , mm | 200 |
| A_{ef} , mm ² | $13,4 \times 10^2$ |
| W_y , mm ³ | $510,4 \times 10^3$ |

Laagid asetsevad üksteisest 200-millimeetrise sammuga. Eeldatakse, et ühe ratta koormus jaguneb kahe laagi vahel ning laudisele langev koormus rakendub otse laagidele. Efektiiivse asetuse jaoks on laagi silde pikkus 2,1 meetrit ning silla otstest konsoolne osa 0,15 meetrit.

Paindekandevõime

Laagile on kõige ebasoodsam koormusolukord poole rattakoormuse viibimine tala keskel. Talale mõjuv paindemoment $M_{Ed} = 6,5 \text{ kNm}$.

$$\sigma_{m,d} = \frac{6,4 * 10^6}{510,4 * 10^3} = 12,5 \text{ N/mm}^2 \quad (3.4.2.7)$$

$$\sigma_{m,d} = 12,5 \text{ N/mm}^2 < f_{m,d} = 16,6 \text{ N/mm}^2$$

Tugevustingimus on täidetud.

Nihkekandevõime

Laagile on kõige ebasoodsam koormusolukord poole rattakoormuse viibimine tala otsal. Talale mõjuv pöikjõud on $Q_{Ed} = 18,7 \text{ kN}$.

$$\tau_d = \frac{3 * 18,7 * 10^3}{2 * 13,4 * 10^3} = 2,1 \text{ N/mm}^2 \quad (3.4.2.8)$$

$$\tau_d = 2,1 \text{ N/mm}^2 < f_{v,d} = 2,2 \text{ N/mm}^2$$

Tugevustingimus on täidetud.

3.4.3 Kasutuspiirseisundi kontroll

Kasutuspiirseisundi kontroll teostatakse silla peatalale. Kontroll teostatakse olukorras, kus sild on koormatud jalakäijatekoormusega $q_k = 5 \text{ kN/m}^2$. Standardis EVS-EN 1995-

2:2005 sätestab rahvuslik lisa, et jalakäijatekoormusega koormatud sillale lubatud maksimaalne läbipaine on $l/200$, kus l on sildeava pikkus. [32] Seega on lubatud läbipaine:

$$w_{lub} = \frac{14700}{200} = 73,5 \text{ mm}$$

Läbipaine omakaalukoormusest:

$$w_{inst,g} = \frac{5 * l^4 * g_k}{384 * I_y * E_{0,mean}} \quad (3.4.3.1)$$

Kus l – sildeava pikkus, mm

g_k – omakaalukoormus, kN/m²

I_y – ristlõike inertsimoment peatelje suhtes, mm⁴

$E_{0,mean}$ – elastsusmooduli keskvärtus, N/mm²

$$w_{inst,g} = \frac{5 * 14700^4 * 1,3}{384 * 6,3 * 10^9 * 12,6 * 10^3} = 10,0 \text{ mm} \quad (3.4.3.1)$$

Läbipaine liikluskoormusest:

$$w_{inst,p} = \frac{5 * l^4 * q_k}{384 * I_y * E_{0,mean}} \quad (3.4.3.2)$$

Kus l – sildeava pikkus, mm

q_k – liikluskoormus, kN/m²

I_y – ristlõike inertsimoment peatelje suhtes, mm⁴

$E_{0,mean}$ – elastsusmooduli keskvärtus, N/mm²

$$w_{inst,p} = \frac{5 * 14700^4 * 6}{384 * 6,3 * 10^9 * 12,6 * 10^3} = 46,0 \text{ mm} \quad (3.4.3.2)$$

Lõplik läbipaine:

$$w_{fin} = w_{inst,g} * (1 + k_{def}) + w_{inst,p} * (1 + \psi_{2,1} * k_{def}) \quad (3.4.3.3)$$

Kus k_{def} – deformatsioonitegur

$\psi_{2,1}$ – kombinatsioonitegur

Deformatsioonitegur k_{def} valitakse materjali ning elemendi kasutusklassi alusel. Peatala on liimpuidust element kasutusklassis 2 ning sellest tulenevalt $k_{def} = 0,8$. [30]

Liikluskoormusele rakenduv kombinatsioonitegur $\psi_{2,1} = 0$.

$$w_{fin} = 10 * (1 + 0,8) + 46 * (1 + 0 * 0,8) = 64 \text{ mm} \quad (3.4.3.3)$$

$w_{lub} = 73,5 \text{ mm} > w_{fin} = 64 \text{ mm}$

Kasutuspiiriseisund on tagatud.

3.5 Sõrestiksilla projekteerimine

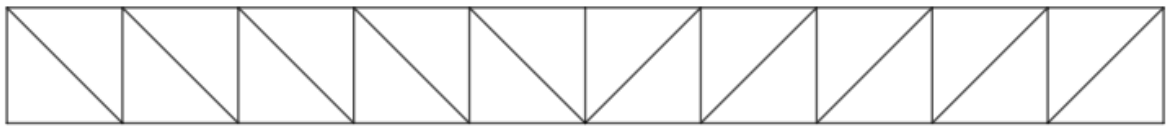
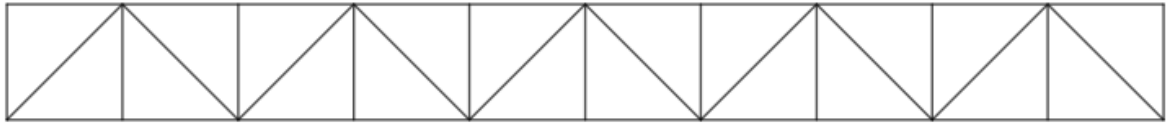
Puidust sõrestiksildade ehitamisel on pikk ajalugu ning nende rajamine on levinud tänapäevalgi. Sõrestiksild on pilkupüüdnud väljanägemisega ning sellega on võimalik ületada pikki sildeavasid. Sõrestiksilla probleemiks on liitekohtade paljusus ning see tekitab riskipiirkondi, kus mustus ja vesi koguneda võivad ja puidule ligi pääsevad. Samuti on võrreldes talasillaga sõrestiksilda keerulisem ulatuslikult ja efektiivselt katta.

Sõrestiksilla projekteerimine hõlmab antud lõputöö raames välimuse paika panemist, puitelementide valimist, olulisemate liitekohtade arvutamist ning konstruktiivselt vaatepunktist tähtsate detailide jaoks lahenduste välja töötamist. Arvutustega näidatakse, et loodud silla kontseptsioon on ka kandevõime seisukohast täiesti toimiv.

3.5.1 Kontseptsiooni paika seadmine

Sild projekteeritakse viisil, et sõrestik moodustaks ka piirded. Seega toetub tekiplaat alumisele vööle ning liikluskoormused on rakendatud punktkoormustena sinna. Selleks, et sõrestik oleks sobilik kasutamiseks piirdena, peab see ulatuma teepinnast vähemalt 1,1 meetrit kõrgemale. [29] Esmased sillamõõdud valiti suhte järgi $l/h = 10$ ning seega on 15-meetrise sõrestiku kõrgus 1,5 meetrit.

Sõrestikutüübi valimisel on tähtsaks eelduseks selle kuju sobilikkus piirdeks. Sel põhjusel oli oluline kasutada mõnda paralleelsete vöödega varianti. Töökindluse tagamiseks on mõistlik otsustada lihtsama skeemi ja väiksema arvu elementidega sõrestiku kasuks. Joonisel nr 3.5.1.1 on toodud valik kaalutud sõrestikutüüpidest, mille seast lõplik otsus tehti. Valikutes oli klassikaline diagonaalvõrguga sõrestik, lisapostidega diagonaalvõrguga sõrestik ning Pratt'i sõrestik. Esteetilistel põhjustel sai valituks viimane. Antud sõrestikul on liitekohtades kõik elemendid omavahel tsentreeritud.

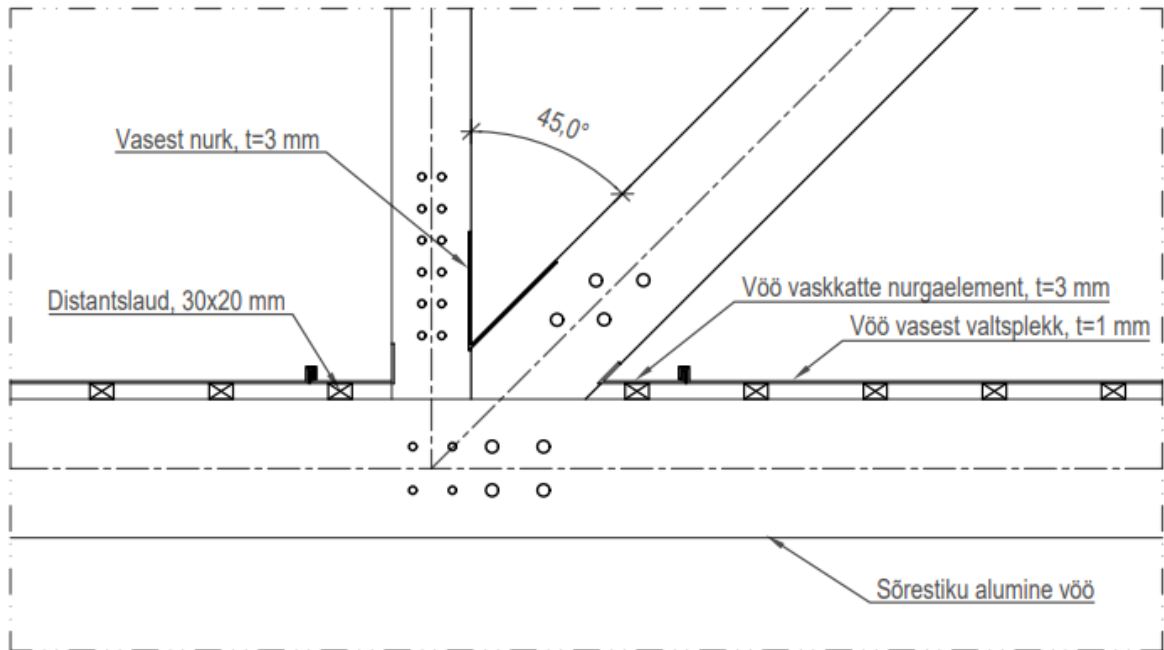


Joonis 3.5.1.1 Projekti raames kaalutud sõrestikuvariandid

Saematerjalist prusside mõõdud on valitud Eesti tootjate piirangutest tulenevalt – maksimaalne standardne prussi suurus on 250x250 mm. Kuna kõik sõrestikuelemendid jäävad nende mõõtude sisse, on need saematerjalist. Kõik elemendid on valitud samasuguse laiusga, et hõlbustada liitekohtade disaini.

Sillal on iga alumise vöö liitekohtade vahele, ehk sammuga 1500 mm, ette nähtud põiksidemed. Saematerjali mõõtude ja tugevusnäitajate piirangute tõttu on nendeks ette nähtud liimpuittalad mõõtudega 280x240 mm.

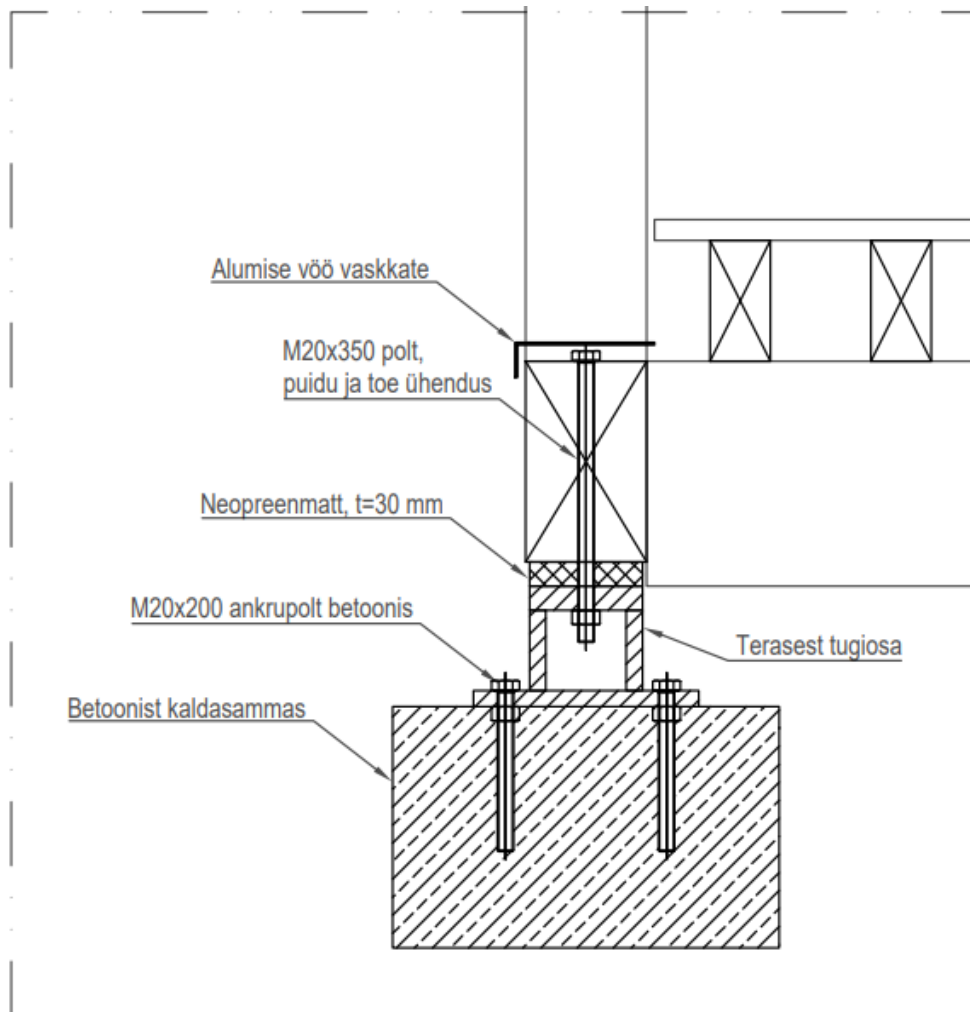
Sõrestiksillal on palju orvakesi, kuhu saab koguneda mustus ja vesi. Selleks, et nurkadesse midagi sellist puidule seisma ei jääks, on ette nähtud paigaldada vasest nurgad lehe paksusega 3 mm. Nende jaoks on puitelementidesse faasitud nurga ulatuses süvendid. Alumise vöö ja ülemise vöö pealmine pind on kaetud metallkattega, millel on õhutusvahed. Kuna põiksidemetel on oluline roll kandvas konstruktsioonis, on needki kaetud.



Joonis 3.5.1.2 Skeem sõrestikuelementidele projekteeritud kaitsevõtetest.

Sõrestikuelementide liitekohtades kasutatakse kinnituselementidena sisemisi metall-lehti ja naagleid. Sel viisil jäävad elementide külgmised pinnad tasapinnalised ja lihtsasti kuivavad ning on väiksem risk vee sissetungiks puitu. Nii metall-lehed kui naaglid on roostevabast terasest. Naaglitele puuritakse ette augud, mis on sama läbimõõduga ning kindlasti mitte suuremad kui naagel. Naagliaukude läbimõõdu tolerants on maksimaalselt 0,1 mm. Peale naaglite sisestamist injekteeeritakse augud akrüülmördiga.

Sõrestiksilla puhul on probleemiks selle konstruktsioonelementide vähene kaitse ilmastikuolude eest. Kuna kandev sõrestik pole vihma eest kaitstud, ei saa toepiirkond näiteks sarnaselt talasillaga olla vee eest pealt ja külgedelt kaitstud. Sellest tulenevalt disainiti toed, mis jääksid täielikult sõrestiku alumise vöö alla ning oleks seega vee kogunemise eest kaitstud. Klassikalise talakinga sarnase toe asemel polditakse alumine vöö kõrgendatud terastoele, mis omakorda on ankurdatud kaldasamba betooni. Terasest ja puidu vahele paigaldatakse neopreenmatt. Sellise toega elimineeritakse võimalus vee ja mustuse kogunemiseks toepiirkonna puidu vahetusse lähedusse.



Joonis 3.5.1.3 Sõrestiksilla tugiosa skeem

3.5.2 Kandevõime kontroll

Sõrestiku tugevusarvutustes käsitletakse elementide liitumiskohti liigenditena. Liikluskoormus rakendub läbi põiktala sõlmedesse. Kõik sõrestiksilla elemendid on saematerjalist tugevusklassiga C24, välja arvatud põiktalad, mis saematerjali piiratud mõõtude ja madalamate tugevusnäitajate tõttu on liimpuidust tugevusklassiga GL28h. Puidu tugevusklassile vastavad normatiivsed tugevus- ja jäikusnäitajad on määratletud standardiga EVS-EN 14080:2013 ning toodud välja tabelis nr 3.4.2.1. Kõik sõrestiksilla elemendid kuuluvad kolmandasse kasutusklassi, kuna need ei ole piisavalt ilmastikuolude eest kaitstud.

Sõrestikule on kõige ebasoodsam olukord tunglemiskoormus. Koormus tekitab alumises vöös ning diagonaalides tõmbejõudusid ja ülemises vöös ning postides survejõudusid. Elementides tekivad kaduvväikesed paindemomendid omakaalust ning kuna nendel on antud olukorras äärmiselt väike mõju süsteemi kandevõimele, siis nende mõju jäetakse

arvestamata. Tekiehituse elementidele on kõige ebasoodsam koormusolukord teenindusveoki viibimine sillal. Sõrestikus tekkivad sisejõud on skeemina välja toodud lisas nr 1.

Alumise vöö kontroll:

Tabel 3.5.2.1 Alumise vöö karakteristikud.

| Tähis | Väärtus |
|----------------------------|--------------------|
| b , mm | 150 |
| h , mm | 250 |
| A_{ef} , mm ² | $53,2 \times 10^3$ |
| A , mm ² | $37,5 \times 10^3$ |
| l_{tugi} , mm | 380 |
| b_{tugi} , mm | 140 |

Paindekandevõime

Elemendis mõjuv tõmbejõud on $N_{Ed} = 241,4$ kN.

$$\sigma_{t,0,d} = \frac{N_{Ed}}{A} \quad (3.5.2.1)$$

$$\sigma_{t,0,d} = \frac{241,4 \cdot 10^3}{37,5 \cdot 10^3} = 6,4 \text{ N/mm}^2 \quad (3.5.2.1)$$

$$\sigma_{t,0,d} = 6,4 \text{ N/mm}^2 < f_{t,0,d} = 7,8 \text{ N/mm}^2$$

Tugevustingimus on täidetud.

Survetugevus ristikiudu

Alumisele vööle teostatakse muljumiskontroll tugede kohal. Elemendile mõjuv põikjõud on $V_{Ed} = 101,6$ kN.

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{101,6 \cdot 10^3}{53,2 \cdot 10^3} = 1,9 \text{ N/mm}^2 \quad (3.4.2.9)$$

$$\sigma_{c,90,d} = 1,9 \text{ N/mm}^2 < k_{c,90} \cdot f_{c,90,d} = 1,5 \cdot 1,3 = 2,0 \text{ N/mm}^2$$

Tugevustingimus on täidetud.

Ülemise vöö kontroll:

Tabel 3.5.2.2 Ülemise vöö karakteristikud.

| Tähis | Väärtus |
|-----------------------|--------------------|
| b , mm | 150 |
| h , mm | 175 |
| A , mm ² | $26,3 \times 10^3$ |
| i_y , mm | 50,5 |
| i_z , mm | 43,2 |
| l_{ef} , mm | 1500 |

Survetugevus pikikiudu

Elemendis mõjuv survejõud on $N_{Ed} = 250,7$ kN.

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_{Ed}}{A} \quad (3.5.2.2)$$

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{250,7 * 10^3}{26,3 * 10^3} = 9,6 \text{ N/mm}^2 \quad (3.5.2.2)$$

$$\sigma_{c,0,d} = 9,6 \text{ N/mm}^2 < f_{c,0,d} = 11,3 \text{ N/mm}^2$$

Tugevustingimus on täidetud.

Stabiilsuskontroll

Talale teostatakse stabiilsuskontroll mõlema telje suhtes. Arvutatakse suhteline saledus y ja z telje suhtes:

$$\lambda = \frac{l_{ef}}{i} \quad (3.5.2.3)$$

Kus l_{ef} – elemendi efektiivne pikkus, mm

i – inertsiraadius, mm

$$\lambda_y = \frac{1500}{50,5} = 29,7 \quad (3.5.2.3)$$

$$\lambda_z = \frac{1500}{43,2} = 34,7 \quad (3.5.2.3)$$

$$\lambda_{rel} = \frac{\lambda}{\pi} * \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \quad (3.5.2.4)$$

Kus λ – paindesaledus

$f_{c,0,k}$ – puidu survetugevus pikikiudu, N/mm²

$E_{0,05}$ – elastsusmooduli 5-protsentiili väärtus pikikiudu, N/mm²

$$\lambda_{rel,y} = \frac{29,7}{\pi} * \sqrt{\frac{21}{7400}} = 0,504 \quad (3.5.2.4)$$

$$\lambda_{rel,z} = \frac{34,7}{\pi} * \sqrt{\frac{21}{7400}} = 0,588 \quad (3.5.2.4)$$

Püsivuskontrollis arvestatakse tegureid $k_{c,z}$ ja $k_{c,y}$, mis iseloomustavad elemendi sirgust ja saledust. Saematerjali puhul on sirgust arvestav tegur $\beta_c = 0,2$. [28]

$$k_c = \frac{1}{k + \sqrt{k^2 - \lambda_{rel}^2}} \quad (3.5.2.5)$$

Kus k_z – elemendi saledust ja sirgust arvestav tegur

λ_{rel} – elemendi suhteline saledus

$$k = 0,5 * (1 + \beta_c * (\lambda_{rel} - 0,3) + \lambda_{rel}^2) \quad (3.5.2.6)$$

$$k_z = 0,5 * (1 + 0,2 * (0,588 - 0,3) + 0,588^2) = 0,702 \quad (3.5.2.6)$$

$$k_y = 0,5 * (1 + 0,2 * (0,504 - 0,3) + 0,504^2) = 0,647 \quad (3.5.2.6)$$

$$k_{c,z} = \frac{1}{0,702 + \sqrt{0,702^2 - 0,588^2}} = 0,921 \quad (3.5.2.5)$$

$$k_{c,y} = \frac{1}{0,647 + \sqrt{0,647^2 - 0,504^2}} = 0,950 \quad (3.5.2.5)$$

$$\sigma_{c,0,d} = 9,6 \text{ N/mm}^2 < k_{c,z} * f_{c,0,d} = 0,921 * 11,3 = 10,4 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{c,0,d} = 9,6 \text{ N/mm}^2 < k_{c,y} * f_{c,0,d} = 0,950 * 11,3 = 10,7 \text{ N/mm}^2$$

Tugevustingimus on täidetud.

Posti kontroll:

Tabel 3.5.2.3 Posti karakteristikud.

| Tähis | Väärtus |
|-----------------------|------------------|
| b , mm | 150 |
| h , mm | 100 |
| A , mm ² | 15×10^3 |
| i_y , mm | 43,3 |
| i_z , mm | 28,9 |
| l_{ef} , mm | 1500 |

Survetugevus pikikiudu

Elemendis mõjuv survejõud on $N_{Ed} = 90 \text{ kN}$.

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{90 * 10^3}{15 * 10^3} = 6,0 \text{ N/mm}^2 \quad (3.5.2.2)$$

$$\sigma_{c,0,d} = 6,0 \text{ N/mm}^2 < f_{c,0,d} = 11,3 \text{ N/mm}^2$$

Tugevustingimus on täidetud.

Stabiilsuskontroll

$$\lambda_y = \frac{1500}{43,3} = 34,6 \quad (3.5.2.3)$$

$$\lambda_z = \frac{1500}{28,9} = 51,9 \quad (3.5.2.3)$$

$$\lambda_{rel,y} = \frac{34,6}{\pi} * \sqrt{\frac{21}{7400}} = 0,587 \quad (3.5.2.4)$$

$$\lambda_{rel,z} = \frac{51,9}{\pi} * \sqrt{\frac{21}{7400}} = 0,880 \quad (3.5.2.4)$$

$$k_z = 0,5 * (1 + 0,2 * (0,880 - 0,3) + 0,880^2) = 0,945 \quad (3.5.2.6)$$

$$k_y = 0,5 * (1 + 0,2 * (0,587 - 0,3) + 0,587^2) = 0,701 \quad (3.5.2.6)$$

$$k_{c,z} = \frac{1}{0,945 + \sqrt{0,945^2 - 0,880^2}} = 0,776 \quad (3.5.2.5)$$

$$k_{c,y} = \frac{1}{0,701 + \sqrt{0,701^2 - 0,587^2}} = 0,922 \quad (3.5.2.5)$$

$$\sigma_{c,0,d} = 6,0 \text{ N/mm}^2 < k_{c,z} * f_{c,0,d} = 0,776 * 11,3 = 8,8 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{c,0,d} = 6,0 \text{ N/mm}^2 < k_{c,y} * f_{c,0,d} = 0,922 * 11,3 = 10,4 \text{ N/mm}^2$$

Tugevustingimus on täidetud.

Diagonaali kontroll:

Tabel 3.5.2.4 Diagonaali karakteristikud.

| Tähis | Väärtus |
|-----------------------|--------------------|
| b , mm | 150 |
| h , mm | 150 |
| A , mm ² | $22,5 \times 10^3$ |

Tõmbetugevus pikikiudu:

Elemendis mõjuv tõmbejõud on $N_{Ed} = 125,4 \text{ kN}$.

$$\sigma_{t,0,d} = \frac{125,4 * 10^3}{22,5 * 10^3} = 6,4 \text{ N/mm}^2 \quad (3.5.2.1)$$

$$\sigma_{t,0,d} = 5,6 \text{ N/mm}^2 < f_{t,0,d} = 7,8 \text{ N/mm}^2$$

Tugevustingimus on täidetud.

Põiktala kontroll:

Tabel 3.5.2.5 Põiktala karakteristikud.

| Tähis | Väärtus |
|----------------------------|--------------------|
| b , mm | 240 |
| h , mm | 280 |
| A_{ef} , mm ² | $45,0 \times 10^3$ |
| W_y , mm ³ | 3136×10^3 |

Paindekandevõime

Elemendis mõjuv maksimaalne paindemoment tekib teenindusveoki teljekoormusest, mis mõjub ava keskele. Põiktalas mõjuv paindemoment on $M_{Ed} = 64,8 \text{ kNm}$. Põiktalas mõjuv põikjõud on $Q_{Ed} = 63,8 \text{ kN}$.

$$\sigma_{m,d} = \frac{64,8 * 10^6}{3136 * 10^3} = 20,7 \text{ N/mm}^2 \quad (3.4.2.7)$$

Juhul, kui liimpuidust elemendi ristlõike kõrgus on paindel väiksem kui 600 mm, võib tugevust suurendada teguriga k_h . [28]

$$k_h = \min \left\{ \left(\frac{600}{h} \right)^{0,1} \right. \\ \left. 1,1 \right. \quad (3.5.2.7)$$

$$k_h = \min \left\{ \left(\frac{600}{280} \right)^{0,1} = 1,08 \right. \\ \left. 1,1 \right. \quad (3.5.2.7)$$

$$\sigma_{m,d} = 20,7 \text{ N/mm}^2 \leq f_{m,d} = 1,08 * 20,2 = 21,8 \text{ N/mm}^2$$

Tugevustingimus on täidetud.

Nihkekandevõime

$$\tau_d = \frac{3 * 63,8 * 10^3}{2 * 45 * 10^3} = 2,1 \text{ N/mm}^2 \quad (3.4.2.8)$$

$$\tau_d = 2,1 \text{ N/mm}^2 < f_{v,d} = 2,5 \text{ N/mm}^2$$

Tugevustingimus on täidetud.

Laagide kontroll:

Tabel 3.5.2.6 Laagide karakteristikud.

| Tähis | Väärtus |
|----------------------------|---------------------|
| b , mm | 100 |
| h , mm | 200 |
| A_{ef} , mm ² | $13,4 \times 10^2$ |
| W_y , mm ³ | $510,4 \times 10^3$ |

Paindekandevõime

Laagid asetsevad üksteisest 200-millimeetrise sammuga. Eeldatakse, et ühe ratta koormus jaguneb kahe laagi vahel ning laudisele langev koormus rakendub otse laagidele. Efektiivse asetuse jaoks on laagi silde pikkus 2,1 meetrit ning silla otstest konsoolne osa 0,15 meetrit. Laagile on kõige ebasoodsam olukord poole rattakoormuse viibimine tala keskel. Talale mõjuv paindemoment on $M_{Ed} = 6,3 \text{ kNm}$. Talale mõjuv põikjõud on $Q_{Ed} = 18,7 \text{ kN}$.

$$\sigma_{m,d} = \frac{6,3 * 10^6}{666,7 * 10^3} = 9,4 \text{ N/mm}^2 \quad (3.4.2.7)$$

$$\sigma_{m,d} = 9,4 \text{ N/mm}^2 < f_{m,d} = 12,9 \text{ N/mm}^2$$

Tugevustingimus on täidetud.

Nihkekandevõime

$$\tau_d = \frac{3 * 18,7 * 10^3}{2 * 13,4 * 10^3} = 2,1 \text{ N/mm}^2 \quad (3.4.2.8)$$

$$\tau_d = 2,1 \text{ N/mm}^2 < f_{v,d} = 2,2 \text{ N/mm}^2$$

Tugevustingimus on täidetud.

Kinnituselementide kontroll:

Sõrestiksilla elementide liitumised projekteeritakse naagelliidetega. Kõik liited projekteeritakse lõikejõududele. Elemente ühendab 8 millimeetri paksune metallplaat, mis asetatakse puitelemendi sisse tehtud lõhikusse. Metallplaat asub täpselt elemendi keskel. Kõik elemendid on omavahel asetatud viisil, et normaaljõud mõjuvad sõlmedes tsentreeritult. Liidetes kasutatakse naagleid läbimõõduga $d=14$ mm. Posti liidetes kasutatakse naagleid läbimõõduga $d=8$ mm, et need kahes reas elementi mahuksid.

Naaglite asetus määratakse standardi EVS-EN 1995-1-1:2005 alusel.

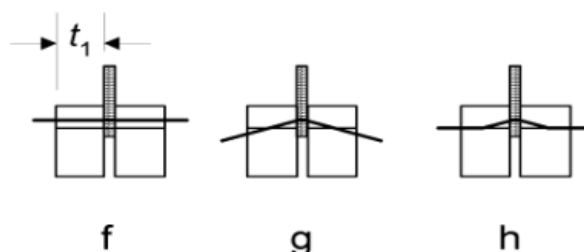
Tabel 3.5.2.7 Naaglite minimaalsed vahekaugused ja kaugused servast ning otsast. [28]

| Vahekaugused ja kaugused servast ning otsast | Nurk kiudude suuna suhtes | Minimaalne vahekaugus või kaugus |
|----------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| a_1 (pikikiudu) | $0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$ | $(3 + 2 \cos \alpha)d$ |
| a_2 (ristikiudu) | $0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$ | $3d$ |
| $a_{3,t}$ (koormatud ots) | $-90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ | $\max(7d; 80 \text{ mm})$ |
| $a_{3,c}$ (koormamata ots) | $90^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ$ $150^\circ \leq \alpha \leq 210^\circ$ $210^\circ \leq \alpha \leq 270^\circ$ | $\alpha_{3,t} \sin \alpha $ $\max(3,5d; 40 \text{ mm})$ $\alpha_{3,t} \sin \alpha $ |
| $a_{4,t}$ (koormatud serv) | $0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$ | $\max([2 + 2 \sin \alpha]d; 3d)$ |
| $a_{4,c}$ (koormamata serv) | $0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$ | $3d$ |

Tabel 3.5.2.8 Arvutatud naaglite minimaalsed vahekaugused elementide kaupa.

| Tähis | Ülemine vöö (d=8 mm) | Ülemine vöö (d=14 mm) | Alumine vöö (d=8 mm) | Ülemine vöö (d=14 mm) | Post | Diagonaal |
|-----------|----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|------|-----------|
| a_1 | 24 | 62 | 24 | 62 | 40 | 70 |
| a_2 | 24 | 42 | 24 | 42 | 24 | 42 |
| $a_{3,t}$ | - | - | - | - | 80 | 98 |
| $a_{3,c}$ | - | - | - | - | - | - |
| $a_{4,t}$ | 32 | 48 | 32 | 48 | - | - |
| $a_{4,c}$ | 24 | 42 | 24 | 42 | 24 | 42 |

Naaglid kontrollitakse lõikejõule standardi EVS-EN 1995-1-1:2005 alusel. Standardi järgi on antud sõrestiku puhul tegemist kahelõikelise liitega, mis on ühendatud igasuguse paksusega terasplaadist keskelemendiga ning seega saab liige puruneda kolmel erineval viisil, nagu on näidatud joonisel nr 3.5.2.1. Liidete osavarutegur $\gamma_M = 1,3$. [32]



Joonis 3.5.2.1 Kahelõikelise igasuguse paksusega terasplaadist keskelemendiga liite purunemise viisid. [28]

Naagli normkandevõime $F_{v,Rk}$ arvutatakse:

$$F_{v,Rk} = \min \begin{cases} f_{h,1,k} * t_1 * d & \text{(f)} \\ f_{h,1,k} * t_1 * d * \left[\sqrt{2 + \frac{4 * M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} * d * t_1^2}} \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & \text{(g)} \\ 2,3 * \sqrt{M_{y,Rk} * f_{h,1,k} * d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & \text{(h)} \end{cases} \quad (3.5.2.8)$$

- Kus $f_{h,k}$ – puitelemendi norm-muljumistugevus, N/mm²
 t_1 – äärmise puitelemendi vähim paksus või süvistussügavus, mm
 d – kinnituselemendi läbimõõt, mm
 $M_{y,Rk}$ – kinnituselemendi volavuspiirile vastava momendi normväärtus, Nm
 $F_{ax,Rk}$ – kinnituselemendi teljesuunaline väljatõmbe normtugevus, N

Naagelliite puhul köieefekt $F_{ax,Rk} = 0$. [28]

$$f_{h,0,k} = 0,082 * (1 - 0,01 * d) * \rho_k \quad \text{kui jõud mõjub kiu suunas} \quad (3.5.2.9)$$

$$f_{h,\alpha,k} = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90} * \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} \quad \text{kui jõud mõjub kiu suhtes nurga all} \quad (3.5.2.10)$$

Kus α – nurk jõu mõjumisuuna ja pikikiu vahel

Okaspuidus asetseva läbimõõduga $d=8$ mm naagli puhul:

$$k_{90} = 1,35 + 0,015 * d \quad (3.5.2.11)$$

$$k_{90} = 1,35 + 0,015 * 8 = 1,47 \quad (3.5.2.11)$$

$$f_{h,0,k} = 0,082 * (1 - 0,01 * 8) * 350 = 26,4 \text{ N/mm}^2 \quad (3.5.2.9)$$

$$f_{h,\alpha,k} = \frac{26,4}{1,47 * \sin^2(90) + \cos^2(90)} = 18,0 \text{ N/mm}^2 \quad (3.5.2.10)$$

$$M_{y,Rk} = 0,3 * f_{u,k} * d^{2,6} \quad (3.5.2.12)$$

$$M_{y,Rk} = 0,3 * 700 * 8^{2,6} = 46,8 \text{ Nm} \quad (3.5.2.12)$$

Okaspuidus asetseva läbimõõduga d= 14 mm naagli puhul:

$$k_{90} = 1,35 + 0,015 * 14 = 1,56 \quad (3.5.2.11)$$

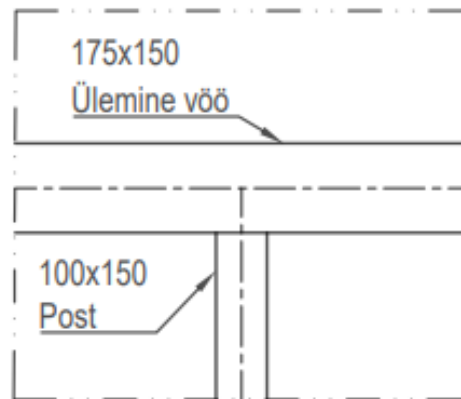
$$f_{h,0,k} = 0,082 * (1 - 0,01 * 14) * 350 = 24,7 \text{ N/mm}^2 \quad (3.5.2.9)$$

$$f_{h,\alpha,k} = \frac{24,7}{1,56 * \sin^2(45) + \cos^2(45)} = 19,3 \text{ N/mm}^2 \quad (3.5.2.10)$$

$$M_{y,Rk} = 0,3 * 700 * 14^{2,6} = 200,5 \text{ Nm} \quad (3.5.2.12)$$

Arvutus postiga sõlmele S-1:

Kinnituselementidele mõjuv lõikejõud $F_{v,Ed} = 90 \text{ kN}$.



Joonis 3.5.2.2 Sõlm S-1

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} 18 * 71 * 8 = 10202,4 \text{ N} \\ 18 * 71 * 8 * \left[\sqrt{2 + \frac{4 * 46,8}{18 * 8 * 71^2}} \right] = 5129,8 \text{ N} \\ 2,3 * \sqrt{46,8 * 18 * 8} = 5964,5 \text{ N} \end{array} \right. \quad (3.5.2.8)$$

Kandevõime tagamiseks vajalike poltide arv leitakse:

$$n = \frac{F_{v,Ed}}{\frac{F_{v,Rd} * 2}{\gamma_M}} \quad (3.5.2.13)$$

$$n = \frac{90 * 10^3}{\frac{5129,8 * 2}{1,3}} = 11,4 \approx 12 \text{ naaglit} \quad (3.5.2.13)$$

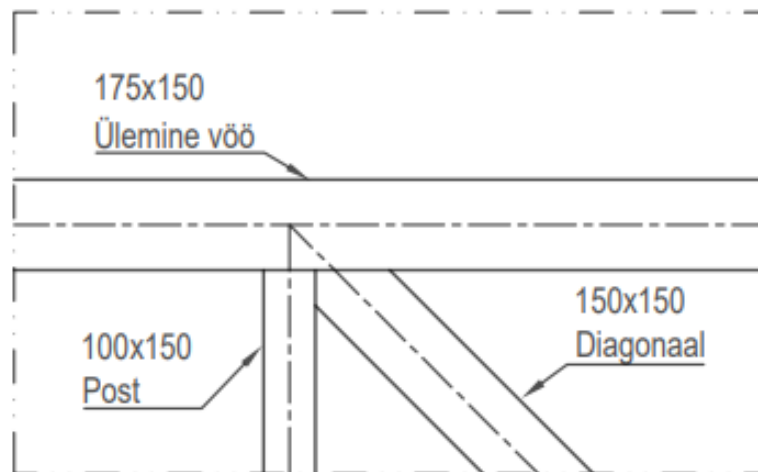
Naaglite asetamisel kahte ritta osutub naaglite arvuks postis ühes reas 4. Kontrollitakse efektiivset kinnitusvahendite arvu. Efektiivsete kinnitusvahendite nõude täitmiseks arvestatakse, et naaglite arv ühes reas on postis 6 ning kinnitusvahenditevaheline samm 45 mm.

$$n_{ef} = \min \left\{ n^{0,9} * \sqrt[4]{\frac{a_1}{13 * d}} \right. \quad (3.5.2.14)$$

$$n_{ef} = \min \left\{ 6^{0,9} * \sqrt[4]{\frac{45}{13 * 8}} = 4,1 \right. \quad (3.5.2.14)$$

Arvutus diagonaaliga sõlmele S-2:

Kinnituselementidele mõjuv löikejõud $F_{v,Ed} = 125,4$ kN.



Joonis 3.5.2.3 Sõlm S-2

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} 19,3 * 71 * 14 = 19167,1 N \\ 19,3 * 71 * 14 * \left[\sqrt{2 + \frac{4 * 200,5}{19,3 * 14 * 71^2}} \right] = 11675,8 N \\ 2,3 * \sqrt{200,5 * 19,3 * 14} = 16922,1 N \end{array} \right. \quad (3.5.2.8)$$

Kandevõime tagamiseks vajalike poltide arv leitakse:

$$n = \frac{125,4 * 10^3}{\frac{11675,8 * 2}{1,3}} = 7,0 \approx 8 \text{ naaglit} \quad (3.5.2.13)$$

Naaglite asetamisel kahte ritta osutub naaglite arvuks diagonaalis ühes reas 2. Kontrollitakse efektiivset kinnitusvahendite arvu. Efektiivsete kinnitusvahendite nõude täitmiseks arvestatakse, et naaglite arv ühes reas on postis 2 ning kinnitusvahenditevaheline samm 70 mm.

$$n_{ef} = \min \left\{ 2^{0,9} * \sqrt[4]{\frac{2}{13 * 14} * 70} = 1,5 \right. \quad (3.5.2.14)$$

3.5.3 Kasutuspiiriseisundi kontroll

Sõrestiku kasutuspiiriseisundit kontrollitakse liidete nihkearvutusega. Nihkemooduli K_{ser} arvutamise valem tuleneb kinnituselemendi tüübist. Teras-puiduga liite puhul saadakse ρ_m väärtus korrutades puidu keskmist tihedust kahega. [28] Läbipaine arvutatakse normatiivsele koormusele $F_k = 92,9$ kN.

$$K_{ser} = \frac{\rho_m^{1,5} * d}{23} \quad (3.5.3.1)$$

Kus ρ_m – puitelemendi keskmine tihedus, kg/m³
 d – kinnituselemendi läbimõõt, mm

$$K_{ser} = \frac{(2 * 350)^{1,5} * 14}{23} = 11273,2 \quad (3.5.3.1)$$

Arvutatakse koormus naagelliite ühe nihkepinna kohta:

$$F = \frac{F_k}{2 * n} \quad (3.5.3.2)$$

Kus F_k – normatiivne koormus, N
 n – naagelliidete arv sõlmes

$$F = \frac{92,9 * 10^3}{2 * 8} = 5806,3 \text{ N} \quad (3.5.3.2)$$

Arvutatakse naagelliite hetkeline nihe:

$$u_{inst} = \frac{F}{K_{ser}} \quad (3.5.3.3)$$

$$u_{inst} = \frac{5806,3}{11273,2} = 0,52 \text{ mm} \quad (3.5.3.3)$$

Arvutatakse naagelliite lõplik nihe:

$$u_{fin} = u_{inst} * (1 + k_{def}) \quad (3.5.3.4)$$

Kus k_{def} – deformatsioonitegur

Deformatsioonitegur valitakse vastavalt materjalile ning kasutusklassile. Kolmandas kasutusklassis eksploateeritava saematerjali puhul $k_{def} = 2$. [30]

$$u_{fin} = 0,52 * (1 + 2) = 1,56 \text{ mm} \quad (3.5.3.4)$$

$$u_{lub} = 75 \text{ mm} > u_{fin} = 1,56 \text{ mm}$$

Kasutuspiiriseisund on tagatud.

4 PROJEKTEERITUD SILDADE ÜLEVAATUSED JA HOOLDUSPLAAN

Silla eluea tagamiseks on ülimalt oluline regulaarne ülevaatuste ning hooldustööde teostamine. Ülevaatuste käigus ilmnenud probleemidele tuleb reageerida esimesel võimalusel. Ülevaatused teostatakse visuaalselt, vajaduse ilmnedes täpsustatakse tulemusi katsetuste ja kontrollmõõtmiste käigus. Ülevaatus käigus koostatakse ülevaatus akt, milles fikseeritakse silla konstruktsioonelementide seisukord. Remonttööde kava on vaid indikatsioon ning probleemide ilmnemisel tuleb reageerida neile kohe.

Hooldustöid teostatakse kaks korda aastas: kevadel ja sügisel. Talveperioodil tuleb sild puhastada lumest, lume ladustamine sillal ei ole lubatud. Libedusetõrjeks ei ole lubatud kasutada soolapõhiseid või muid puitu kahjustavaid aineid.

Korraliste hooldustööde käigus tehtavad tööd:

- sillateki puhastamine harjaga;
- silla puhastamine mustusest – iseäranis liitekohtade ja muude kontaktpindade piirkonnas ja tugeudel;
- naaglite ja muude kinnitusvahendite korrektse elemendi sees asetuse kontrollimine ning vajadusel pingutamine;
- silla all ja ümbruses haljastuse hooldamine, vajadusel eemaldamine, et taimed ei oleks kontaktis ega ligiläheduses silla puitelementidega;
- metallist kaitseplaatide seisukorda kaitsmisvõimete seisukohalt kontrollimine ja vajadusel korrigeerimine või välja vahetamine;
- toepiirkondade kontrollimine.

Tabel 4.1 Silla remonttööde soovituslik kava

| Tegevus | Kordustsükkel (aastates) |
|-------------------------------------------------|--------------------------|
| Puidust teekatte vahetus | 25 |
| Nähtavate värvitud puitelementide üle värvimine | 10 |
| Kaetud värvitud puitelementide üle värvimine | 25 |
| Kontrollida mõõteseadmetega niiskussisaldust | 5 |

KOKKUVÕTE

Lõputöö eesmärgiks oli projekteerida Eesti tingimustesse sobilik puitsild ning projekteerimisprotsessi toetamiseks uurida olulisi kaitse- ja ehitusvõtteid puidust ehitamisel.

Lõputöö raames uuriti puidu omadusi ehitusmaterjalina ning arutleti, kuidas rakendada puidukaitsemeetodeid nõnda, et puidust oleks võimalik ehitada kvaliteetselt ja nõuetekohaselt toimivat silda. Uuringu tulemusena valmis kaks projektlahendust perspektiivsetele puidust kergliiklussildadele Tallinna külje all.

Lõputöö esimene peatükk andis lühikese ülevaate puitsildade ajaloost ning märkimisväärsematest saavutustest nii Eestis kui ka mujal maailmas. Teine peatükk oli sügavuti uurimusliku sisuga ning selle raames töötati läbi kvaliteetselt ja ohutult toimiva puitsilla projekteerimiseks vajalikud teadmised. Uuriti puidukaitsemeetodeid – kuidas keemilise töötusega või puitu modifitseerides on võimalik tõsta materjali vastupidavust kahjurite ja ebasoodsate ilmastikuolude suhtes. Samuti töötati elementhaaval läbi erinevad võimalikud ehituslikud kaitsevõtted. Uuriti ka, kuidas peaks teostama ekspluatatsiooniaegseid ülevaatusi, kuidas hinnata kahjustusi ning mis viisidel on võimalik väiksemaid tavapäraseid kahjustusi parandada.

Uurimusliku osa järel koostati lõputöö praktilises pooles kaks projekti Laagrisse detailplaneeringuga ette nähtud puidust kergliiklussillale. Kergliiklussillale projekteeriti kaks lahendust: talasild ning sõrestiksild. Silla projekteerimisel lahendati olulisemad konstruktsiooniküsimused – kuidas luua Eesti kliimatilistele oludele vastav sild. Projekti raames pandi paika keskkonda sulandumiseks nõuded välimusele, nähti ette puidukaitsevahendite kasutamise ja ehitustööde teostamise kord, lahendati ilmastikuoludele tundlike sõlmede ja elementide kaitsevõtted ning nähti ette soovituslik hooldus- ja renoveerimistööde teostamise kord. Projekteeritud sildade teostatavust tõestati määravamate detailide standardipõhiste arvutustega. Projekteerimisprotsessis põhjendati põhjalikult erinevate konstruktiivsete lahenduste teostatavust ja mõistlikkust. Muuhulgas toodi näiteks olemasolevate sildade erinevad levinud või saatuslikud vead ning kuidas antud projekti raames neid on välditud. Sildade projekti koostamisel pöörati suurt tähelepanu sellele, et sarnaste meetoditega sildade ehitamine oleks Eesti oludes päriselt teostatav – ehitusmaterjalidena kasutati kohalikul ehitusturul saadaolevaid tooteid ning otsuste langetamisel mõeldi läbi ka majanduslik mõttekus, et mitte ette näha ülemäära kulukaid lahendusi. Lisaks lahendusi selgitavatele skeemidele on lõputöö lisades nii tala- kui sõrestiksilla üldjoonised ja tüüpsõlmede joonised.

SUMMARY

The purpose of the thesis is to design a timber bridge suitable for Estonian conditions. For that, a thorough research was done beforehand on how to protect timber.

For the thesis the characteristics of timber were studied, and research was done on how to implement different methods to protect wood and construct a durable bridge of a great quality. As a result of the research, two variants for a prospective pedestrian bridge in the suburban area of Tallinn were proposed.

First chapter of the thesis offers a brief overview of the history of timber bridges and introduces some of the most remarkable achievements in construction of timber bridges in Estonia and elsewhere in the world. Second chapter studies thoroughly the knowledge on how to design a durable and reliable timber bridge. Different protection methods were explored – how to make wood more durable against the attacks of pests and fungi by chemical treatment or modifications. In addition, different methods of protection of details by constructive means were discussed. Last, it briefly discussed, how to take care of the bridge during its service life and how the inspections should be correctly conducted during exploitation.

The second half of the thesis is about designing two prospective pedestrian bridges in Laagri parish according to current detail planning. Two different designs were proposed – a truss bridge and a beam bridge. These bridges are an example of how to design a timber bridge suitable for Estonian conditions. Within the project several important decisions were made – what the bridge should look like to go together with the surroundings, which wood protection methods to use, what to turn attention to during the construction process, the design of joints and elements vulnerable to the weather and what the inspections and renovation should be like. The serviceability and possibility of constructing these bridges was backed up by calculations for the main bearing details. In the design process, the reasons for different solutions were discussed thoroughly. For that, multiple examples of unfortunate design were shown and discussed, how to prevent such problems. An important part in the decision-making process was looking up, what is available and economically reasonable in Estonian conditions – what materials are available at what price – and acting upon that. In addition to schemes throughout the thesis, in the appendixes there are also technical drawings of the designed beam and truss bridge.

KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] A. Dimitrova, R. Ivanov, M. Mašlak, D. Partov, M. Petkov, D. Sergeev, "The development of wooden bridges through the ages – a review of selected examples of heritage objects. Part 1 – the milestones", doi: 10.4467/2353737XCT.16.161.5772. [Online] Kasutatud 14.04.2023
- [2] R. Crocetti, „Timber Bridges: General issues, with particular emphasis on Swedish typologies“, in *20. Internationales Holzbau-Forum IHF 2014*, Garmisch-Partenkirchen, 2014. Loetud aadressil: https://www.forum-holzbau.com/pdf/61_IHF_2014_Crocetti.pdf. Kasutatud 08.10.2022
- [3] U. Hundhausen, K.-C. Manhart, "Review on the protection of timber bridges in Norway and other countries" in *48th IRG Annual Meeting*, Ghent, 2017. Loetud aadressil: https://www.researchgate.net/publication/329216655_Review_on_the_protection_of_timber_bridges_in_Norway_and_other_countries. Kasutatud 14.04.2023
- [4] R. B. Abrahamsen, "Bridge across Rena River – "World's strongest timber bridge"", in *WCTE2008 - 10th World Conference on Timber Engineering*, Miyazaki, 2008. Loetud aadressil: https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/37222836/Bridge_across_Rena_River_-_Worlds_strongest_timber_bridge-libre.pdf?1428331428=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DBridge_across_Rena_River_Worlds_stronges.pdf&Expires=1684054640&Signature=GKew7IsSrSWcRScWq6jPN~ERFwtiXtCBMi7SmM0dkiA8IC3Xkbei7LABDYnhgl9Unoouu-cNa2NaSwRKG0mrRb6PEFMvr4L~wKcMPWSdgQi-TQuGQyxRnz1gWt9TSbhXO7elo-BcvT6M2YecL3UbQr6rOjr6ET27Y9pMzLYqG8BaTAX6i~BfvsSzDYEL0ECUWC-R-fVWD-AO-wth6ce2BnNz4ueuIdEBFZkVnXy2dcjfrNuRxT3z7Lbu0tA86K1eEF-DlhOyV9Ld1oqrsqiBR7EFnXHJy1INMTuK~JE3kQkzqoZgK68hyFF48Jehjqv-N3U3xcFDymeVOvadAc3lw__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA. Kasutatud 29.09.2022
- [5] S. Fortino, K. Malo, A. Pousette, L. Salokangas, S. Thelandersson, J. Wacker, „Durable timber bridges: Final report and guidelines“, RISE Research Institutes of Sweden, Skellefteå, Roots, 2017. [Online]. Loetud aadressil: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1116787/FULLTEXT01.pdf>. Kasutatud 26.02.2023
- [6] F. Bongers, B. Tjeerdsma, „The Making of a Traffic Timber Bridge of Acetylated Radiata Pine“, in *European Conference on Wood Modification 2009*, Stockholm, 2009. Loetud aadressil: https://www.researchgate.net/publication/270047011_

The_Making_of_a_Traffic_Timber_Bridge_of_Acetylated_Radiata_Pine.

Kasutatud 09.04.2023

- [7] T. Kändler, „Eesti sai esimese katusega silla“, *Eesti Päevaleht*, vol 133, pp. 20, 2013. Kasutatud 13.04.2023
- [8] S. Ayanleye, H. Militz, V. Nasir, K. Udele, X. Zhang, “Durability and protection of mass timber structures: A review”, *Journal of Building Engineering*, vol. 46, pp. 103731, 2022, doi: 10.1016/j.jobbe.2021.103731. Kasutatud: 08.10.2022
- [9] J. Abed, M. Neave, S. Rayburg, J. Rodwell, “A Review of the Performance and Benefits of Mass Timber as an Alternative to Concrete and Steel for Improving the Sustainability of Structures”, *Sustainability*, vol 14, pp. 5570, 2022, doi: 10.3390/su14095570. [Online] Kasutatud 25.09.2022
- [10] A. Just, E.-J. Just, K. Öiger, *Puit- ja puidupõhised konstruktsioonid*. Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2015.
- [11] M. P. Ansell, *Wood Composites*. Elsevier Science, 2015. [E-book]. Loetud aadressil: <https://books.google.ee/books?id=dU-dBAAAQBAJ&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false>
- [12] U. Noldt, K. Pilt, „Hoonetes puitu kahjustavad putukad“, *Keskkonnatehnika*, vol 4, pp. 20-25, 2013
- [13] Y. Fukasawa, „Ecological impacts of fungal wood decay types: A review of current knowledge and future research directions“, *Ecological Research*, vol 36, pp. 910-931, 2021, doi: 10.1111/1440-1703.12260. [Online] Kasutatud 11.04.2023
- [14] C. Antwi-Boasiako, A. Atweri-Obeng, „Leachability and efficacy of CCA, creosote and two durable hardwood extracts in Ceiba pentandra (L.) Gaertn.-treated stakes against termite attack“, *Journal of the Indian Academy of Wood Science*, vol 9, pp. 14-21, 2012, doi: 10.1007/s13196-012-0066-3. [Online] Kasutatud 21.01.2023
- [15] D. Aydemir, A. Can, H. Sivrikaya, I. Tumen, „Weathering Performance of Wood Treated with Copper Azole and Water Repellents“, *Wood Research*, vol 62, pp. 437-450, 2017. Kasutatud: 02.03.2023.
- [16] R. Keller, A. La Spina, D. Tingley, „Timber pile bridges, a guide for timber piling specifications, condition assessments, effective maintenance & repairs options“, *Pilebuck*, vol 35, pp 114, 2019. Loetud aadressil: <https://quakewrap.com/pdfs/Pile-Buck-Timber-Repair-Featuring-PileMedic-Web.pdf>. Kasutatud: 31.03.2023.
- [17] *Tanalith™ and Tanatone™ Treated Timber User Guide*. Lonza Wood Protection, 2018. Loetud aadressil: <https://lotustimber.com/wp-content/uploads/2017/09/Tanalith-T-Timber-User-Guide.pdf>. Kasutatud: 22.04.2023.

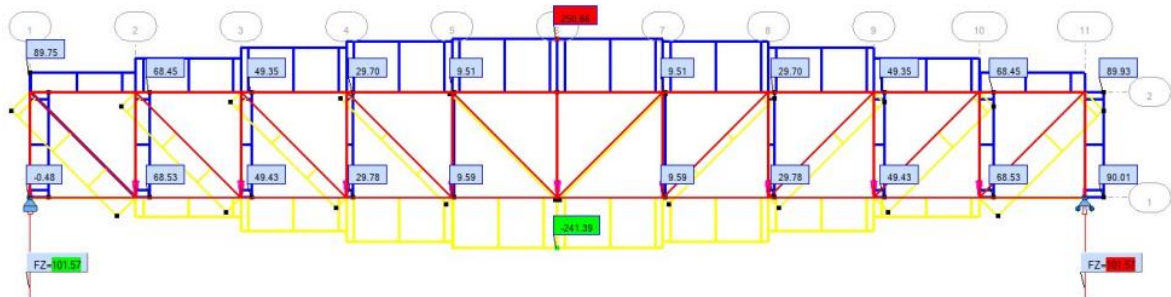
- [18] T. Dyken, H. Kepp, O. Kleppe, „Kleppe, Kepp and Dyken: Contribution to Details on Timber Bridges“, in *International Conference on Timber Bridges 2013*, Las Vegas, 2013. Loetud aadressil: https://intrans.iastate.edu/app/uploads/sites/12/2019/03/ID_79-Kleppe.pdf. Kasutatud: 14.04.2023.
- [19] *Design of timber structures – volume 1*, P. Godonou (Ed.). Swedish Forest Industries Federation, 2022. [E-book]. Loetud aadressil: <https://www.swedishwood.com/siteassets/5-publikationer/pdfer/sw-design-of-timber-structures-vol1-2022.pdf>. Kasutatud: 21.09.2022.
- [20] C. Angst, N. Bueche, A. Müller, M. Schiere, “Creating a connection between asphalt wearing surface and timber bridge decks“, in *4th International Conference on Timber Bridges*, Biel, 2022, doi: 10.24451/y8h3-6087. [Online] Kasutatud 29.09.2022
- [21] P.-A. Fjellström, A. Gustafsson, A. Just, E. Just, A. Pousette, „Põhjamaades kasutatud puitsildade lahendused ja erinevate konstruktiivsete lahenduste vastupidavuse teadusanalüüs koos kasutusettepanekutega Eestis“, publitseerimata.
- [22] R. J. Ross, R. H. White, *Wood Condition Assessment Manual: Second Edition*. Madison: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2014. [E-book]. Loetud aadressil: <https://www.fs.usda.gov/research/treearch/47194>. Kasutatud 13.04.2023
- [23] C. Legg, D. Tingley, „Timber Bridge Best Practices and the State of the Industry in Atlantic Canada“, Wood Research and Development, 2020. [Online]. Loetud aadressil: <https://wood-works.ca/wp-content/uploads/2020/12/Timber-Bridge-Industry.pdf>. Kasutatud: 02.03.2023
- [24] EVS-EN 1991:2:2004+NA:2007 EUROKOODEKS 1: EHITUSKONSTRUKTSIOONIDE KOORMUSED Osa 2: Sildade liikluskoormused, Eesti standardimis- ja akrediteerimiskeskus.
- [25] V. Aitsam jt, *Statistiline mets. 20 aastat statistilist metsainventeerimist Eestis*. K-Print, 2019. [E-book]. Loetud aadressil: <https://www.digar.ee/arhiiv/nlib-digar:634818>. Kasutatud: 22.04.2023.
- [26] *Specifiers Guide. High Pressure Treated Timber*. Lonza Wood Protection, 2021. Loetud aadressil: <https://www.tanalisedtimber.co.uk/TanalithE/media/TanalithE/NEWS%20IMAGES/Tanalith-Specifiers-Guide-June20.pdf>. Kasutatud: 22.04.2023.
- [27] T. Kalamees, „Ajaloolised katusekatted“, *Pööning*, vol 20, 2020. Loetud aadressil: <https://www.ajakiripooning.ee/ajaloolised-katusekatted/>. Kasutatud: 20.04.2023.

- [28] EVS-EN 1995-1-1:2005+A1+NA+A2 *EUROKOODEKS 5: Puitkonstruktsioonide projekteerimine Osa 1-1: Üldist. Üldreeglid ja reeglid hoonete projekteerimiseks*, Eesti standardimis- ja akrediteerimiskeskus.
- [29] Tee projekteerimise normid (03.01.2022). Riigi Teataja I. Loetud aadressil: <https://www.riigiteataja.ee/akt/131122021034?leiaKehtiv>. Kasutatud 22.04.2023
- [30] EVS-EN 14080:2013 *PUITKONSTRUKTSIOONID Lamell-liimpuit ja plankliimpuit. Nõuded*, Eesti standardimis- ja akrediteerimiskeskus.
- [31] EVS-EN 338:2016 *EHITUSPUIT Tugevusklassid*, Eesti standardimis- ja akrediteerimiskeskus.
- [32] EVS-EN 1995-2:2005+NA:2007 *EUROKOODEKS 5: PUITKONSTRUKTSIOONIDE PROJEKTEERIMINE Osa 2: Sillad*, Eesti standardimis- ja akrediteerimiskeskus.

LISAD

Lisa 1 – Sõrestiksilla sisejõud

Ekraanipilt arvutusprogrammist Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2022



GRAAFILINE OSA