

Puidust, puidupõhised ja teistest materjalidest komposiitkonstruktsioonid

KARL ÕIGER, Tallinna Tehnikaülikooli professor

Viiimastel kümnenditel on komposiitmaterjalide ja -konstruktsioonide valmistamisel ja kasutamisel ehituses saavutatud märkimisväärsed tulemused. See on kaasa toonud muudatusi ka traditsioonilise projekteerimise põhimõtetes. Tarvitakse siinjuures komposiitkonstruktsiooni mõistet teataval määral ebalevalt, sest ka kirjanduses ei ole see päris selgelt ja üheselt veel välja kujunenud. Võiks vaadelda kahte suunda:

- 1) komposiitmaterjalid (süsinikkiu, klaaskiud, aramiid või kevlari jne baasil), neist valmistatud üksiktooted (torud, profiilid, plaadid) ja läbinisti komposiitmaterjalidest elementidest kompleksed konstruktsioonid;
- 2) konstruktsioonelemendid: eri materjalidest (metall, betoon, puit, ka komposiitmaterjalid) valmistatud osadest koosnevad komposiitsüsteemid, mis töötavad koormuse all nii, et eri materjalidest osad ei muutu üksteise suhtes domineerivaks.

Konstruktsioone, kus kasutatakse armeeringuvardeid, komposiitkonstruktsioonide hulka üldiselt ei loeta, ehkki materjalid töötavad selles komposiidi moel. Ka raudbetoonist põranda (lae) plaadid teraskarkassil ei tööta tavaliselt koos selle karkassiga ja seega ei määra kogu konstruktsiooni klassifikatsiooni.

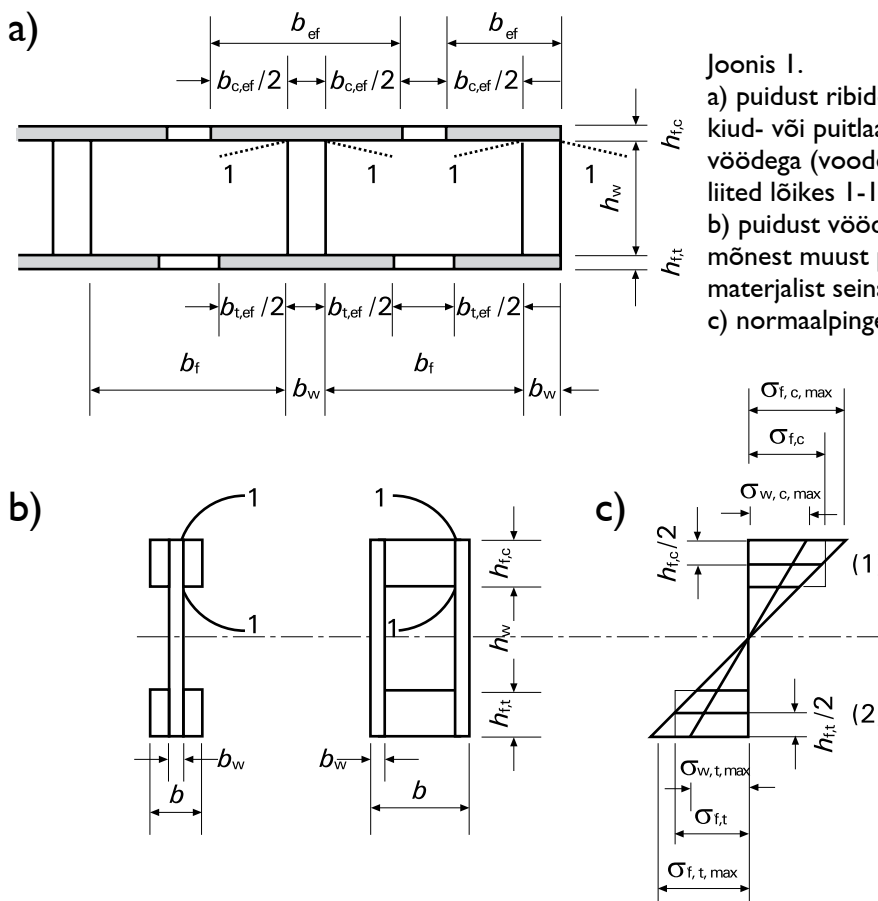
Käesolevas artiklis üritan analüüsida puidust ja puidupõhistest elementidest ning teistest materjalidest, nagu plast, betoon/raudbetoon või teras, omavahel liidetud ja koormuse kandmisel koos töötavate (nt terasega sarrustatud puittalad) komposiitkonstruktsioonide valmistamise ja kasutamise võimalusi. Tavaliselt on sellised konstruktsioonid

koostatud nii, et iga materjal töötab just temale soodsamalt otstarbekamalt viisil. Teine eesmärk on saada lõppkokkuvõttes ühes või teises mõttes efektiivsem (materjalikulu, maksumus) lahendus. Artikli maht võimaldab käsitleda

kõiki selle keeruka konstruktsioonitüübiga seotud küsimusi siiski vaid põgusalt.

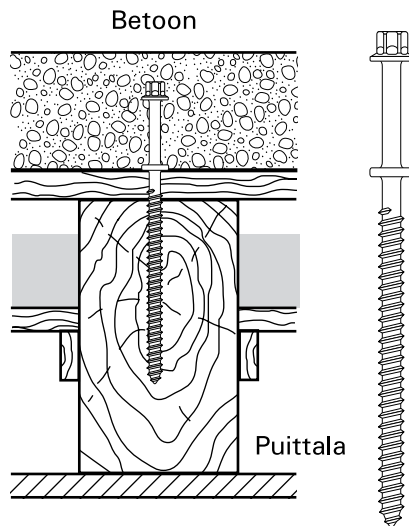
Millistest konstruktsioonidest on juttu?

Komposiitkonstruktsiooniks võime mõõndustega nimetada mis tahes liitkonstruktsiooni, kus on kokku liidetud kas erinevatest või ka samast materjalist elemendid. Materjalid on erinevate mehaaniliste või füüsikaliste omadustega, tugevamad neist jäävad raskemini koormatud piirkondadesse ja nõrgemad vähem koormatud piirkondadesse. Vahel nimetatakse selliseid konstruktsioone ka komplekskonstruktsioonideks.

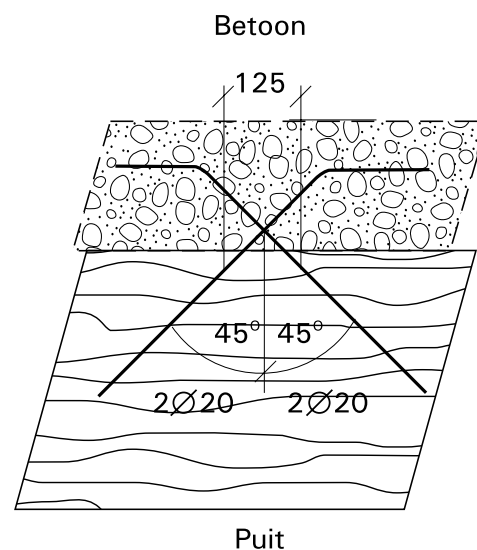
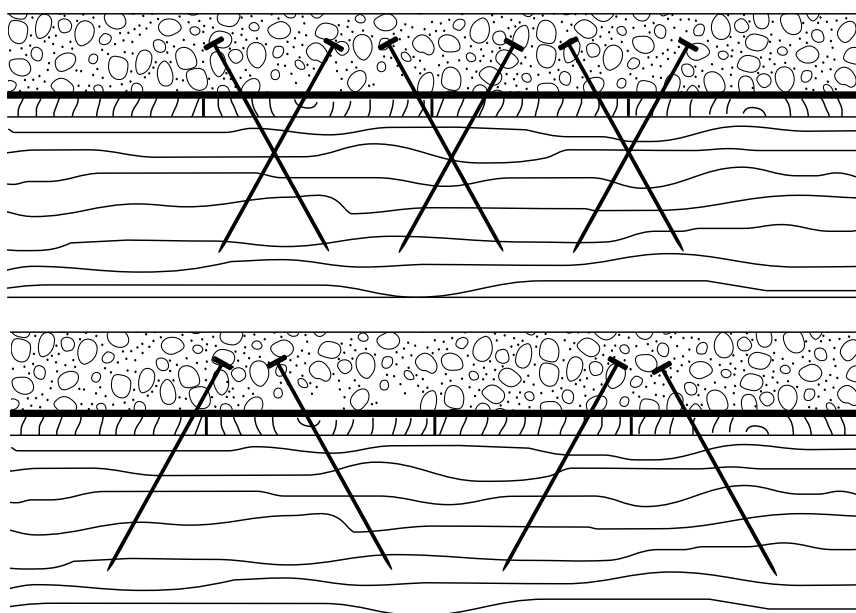


Üsna hiljuti on kasutusele tulnud mõiste hübriidkonstruktsioon, kuid sel puhul pole alati selgelt formuleeritud, millega on tegelikult tegu. Üldiselt peaks hübriidkonstruktsioon olema selline, kus põhikonstruktsioon töötab ühte tüüpi konstruktsioonina (nagu raam, kaar, koorik, rippkatus jne) ja selle osad omakorda teist tüüpi konstruktsioonina. Näiteks võib tuua ruumilise koorik- või võlv-tüüpi katusekonstruktsiooni, mis koosneb *tensigrit*-tüüpi osadest (surutud-tõmmatud varrastest).

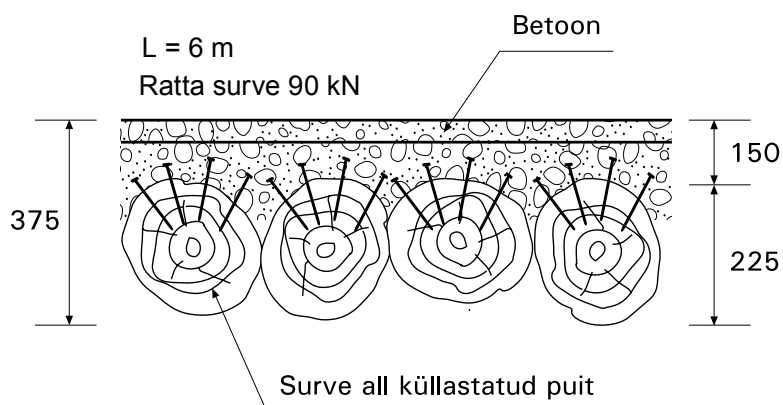
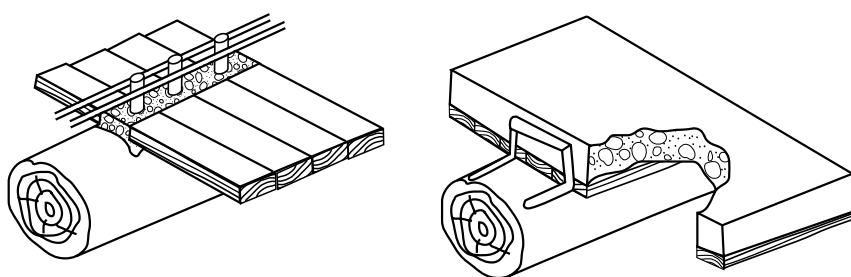
Alljärgnevalt käsitlem komposiitkonstruktsioone, milles üks materjal on puit. Joonistel 1...14 on esitatud mõned enam kasutatavate konstruktsioonide skeemid.



Joonis 2. Puittaladega ja betoon (raudbetoon) plaadiga komposiitne laekonstruktsioon. Joonisel näidatud spetsiaalkruvide asemel võib kasutada terastorst valmistatud ja puittalasse puuritud pesadesse kinnitatud nihkesidemeid. Esitatud lahendus sobib hästi vana puittaladega vahelae kandevõime tõstmiseks.

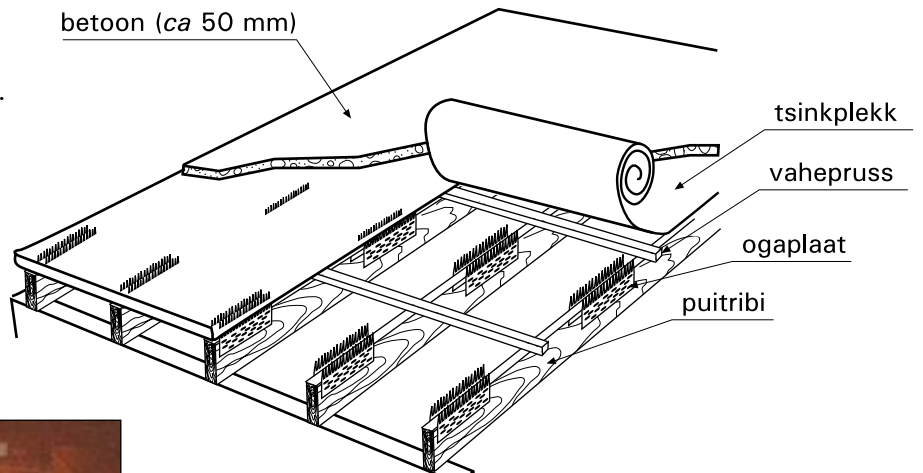


Joonis 3. Puit-betoonkonstruktsiooni võimalik terrassidemete lahendus.

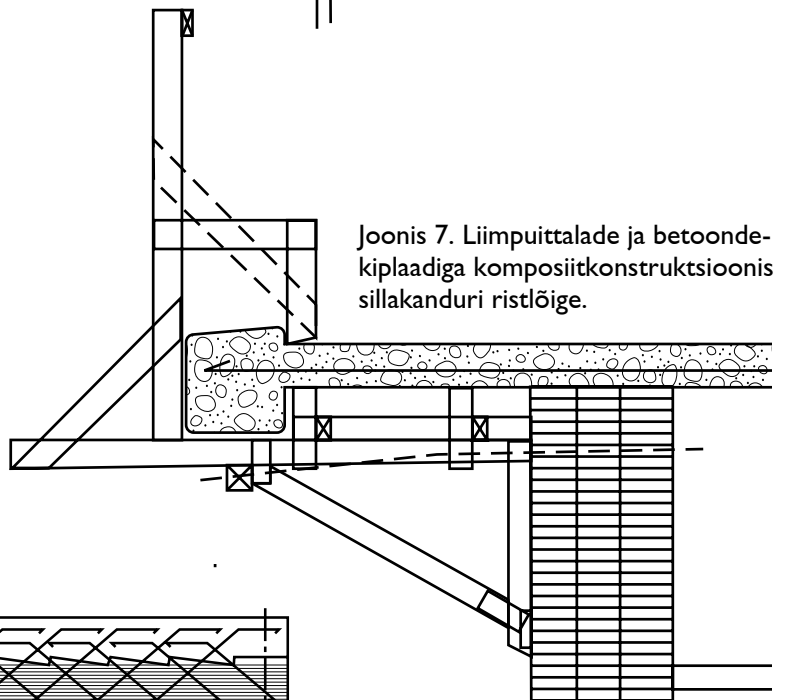


Joonis 4. Puidust-betoonist komposiitkonstruktsioonis lihtsalt valmistatav väikeseavalise silla avakandur. Sidemeks on kasutatud suuri naelu.

Joonis 5. Spetsiaallogaplaatidest sidemetega puit-betoonvahe(katus)lae paneel.

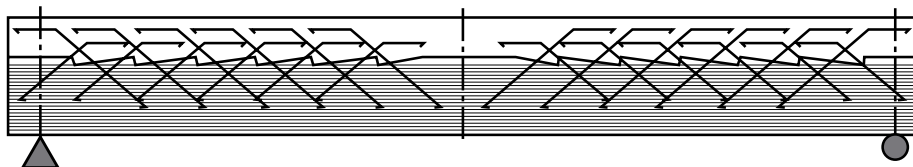


Joonis 6. Spetsiaallogaplaatidest sidemetega puit-betoonpaneeli katsetamine TTÜ laboris.

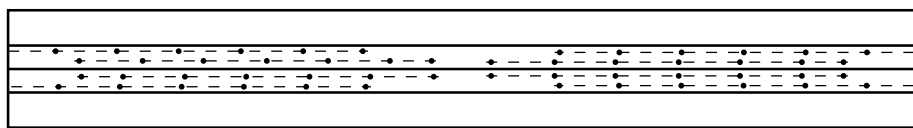


Joonis 7. Liimpuittalade ja betoondeklapladiga komposiitkonstruktsioonis sillakanduri ristlõige.

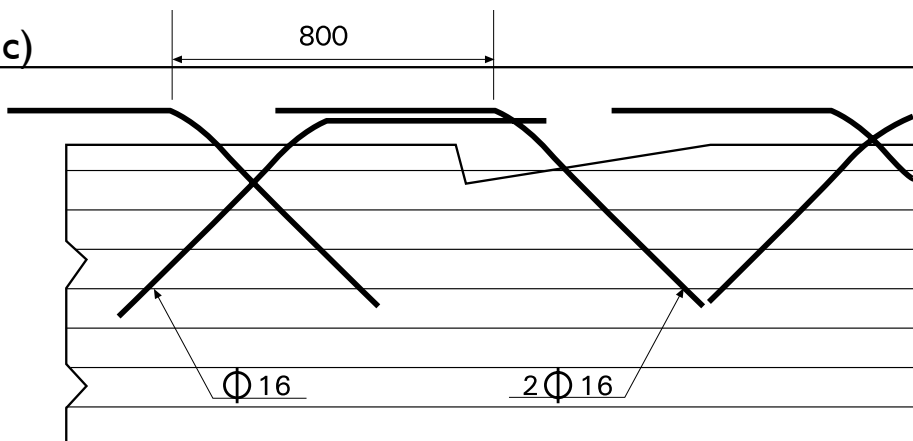
a)



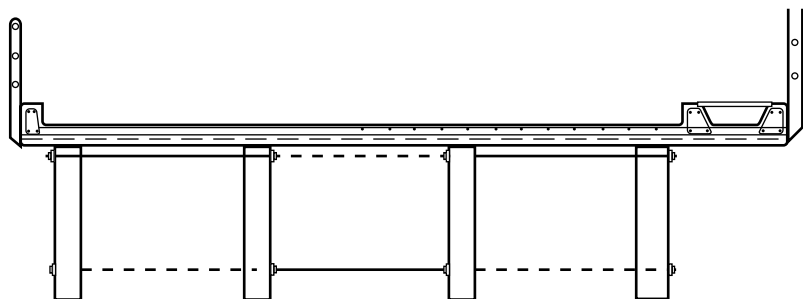
b)



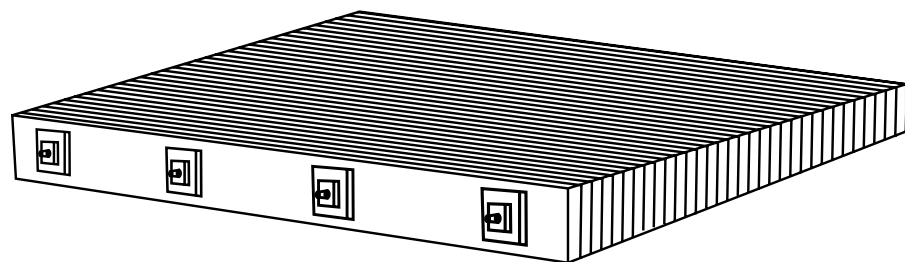
c)



Joonis 8. Betonplaadi ja liimpuittala nihkesidemete võimalik lahendus, a) kanduri külgsaade, b) pealtvaade, c) võimalik lahendus toe piirkonnas.



Joonis 9. Üks puit-betoonisilla lahendusi, dekikonstruktsioonis on kasutatud puitlamellplaati.



Joonis 10. Külgsuunas eelpingestatud puitlamellplaadi konstruktsioon.



Joonis 11. Sisseliimitud profileeritud varrastega armeeritud liimpuittala.

Komposiitkonstruktsioonide eelistest ja kasutusvõimalustest

Nagu juba märkisin, koostatakse komposiitkonstruktsioonid üldiselt nii, et iga materjal töötaks just temale soodsamal või otstarbekamal viisil. Kui näiteks tegu on puit-betoonkonstruktsiooniga, siis betoon peaks asuma elemendi selles tsoonis, kus mõjuvad suurimad survepinged (survejõud), ja puit selles tsoonis, kus mõjuvad tõmbe- ja paindepinged. Samas on sillakonstruktsiooni puhul survetsoonis asuv betoon- või raudbetoonplaat ühtlasi hea dekikonstruktsioon.

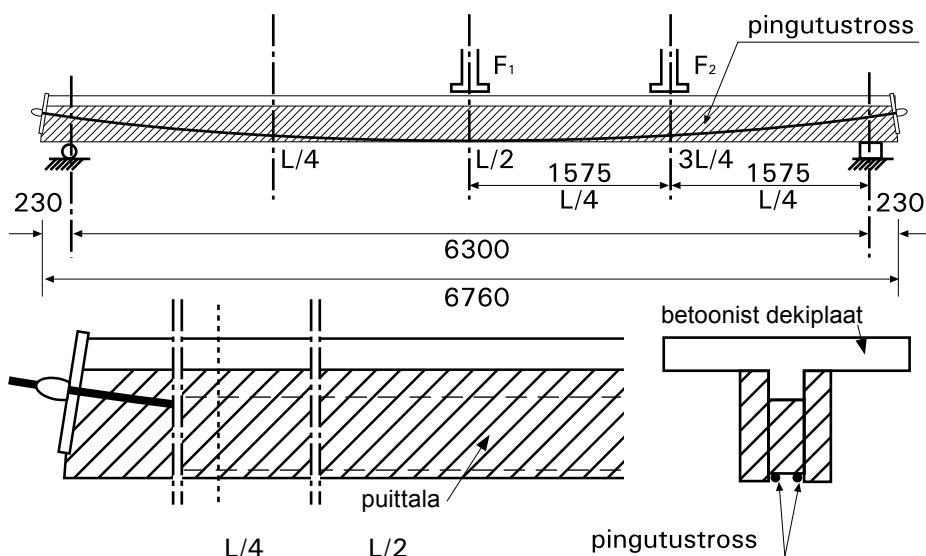
Üks ökonomne, suhteliselt suure kandevõimega ja kerge (lae)paneeli lahendus on puitribidest ja vineerist, puitkiud-, puitlaastplaatidest või plastist vöödega (vooderdisega), samuti puidust vöödega ja vineerist või mõnest muust puidupõhisest materjalist seinaga talad.

Joonisel 2 esitatud lahendust on soodne (lihtne) kasutada vana puittaladega vahelae kandevõime tõstmiseks. Väga lihtsa, oma jõududega ehitatava väiksemate avadega silla lahendus on esitatud joonisel 4.

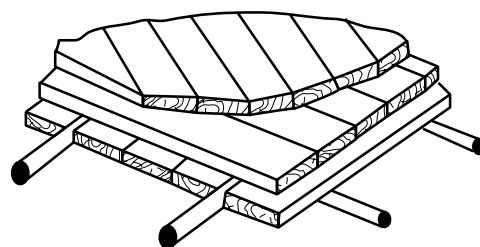
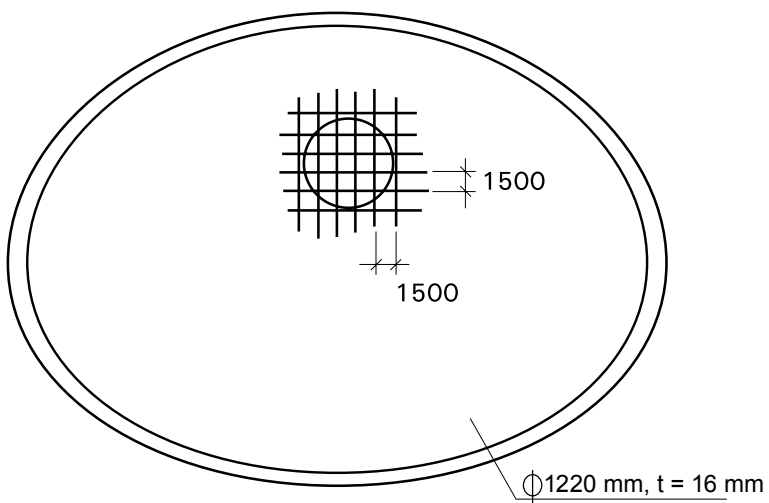
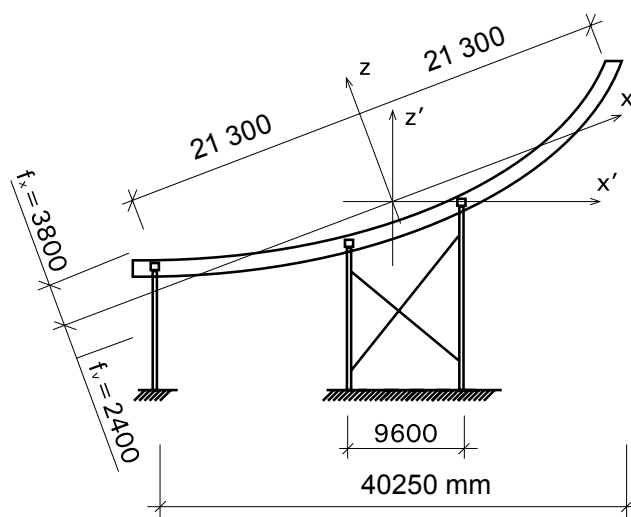
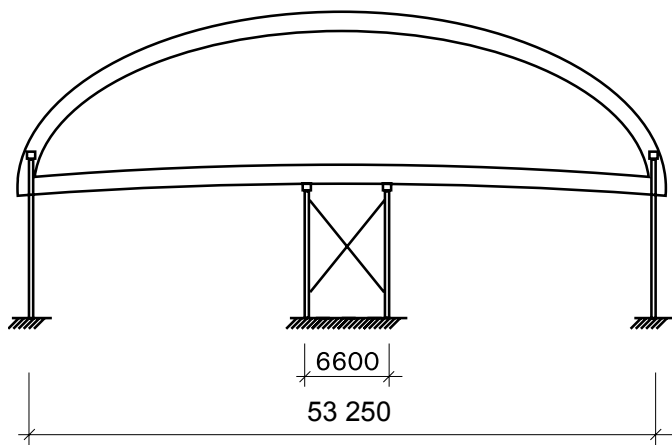
Komposiitkonstruktsiooniga puittalade (ja laudise) üheks eeliseks võib kujuneda asjaolu, et need võivad olla pealebetoneeritavale ja muudele peal tehtavatele ehitustöödele piisavaks aluskonstruktsiooniks, nii et lisa(ajutist)tugistikku ei ole vaja.

Üks soodne tehases valmistatav puidust-betoonist vahe- või katuslaepaneeli konstruktsioon on esitatud joonistel 5 ja 6. Selle konstruktsiooni eelised /3/:

- 1) kui puidust vahelae puhul kaasnevad alati heliisolatsiooniprobleemid, siis selle lahendusega saab neid oluliselt vähendada: heliisolatsiooniks vajalik tihedus ja osaliselt ka paneeli mass on tagatud;
- 2) paneeli mass 100...150 kg/m² on umbes pool betoonpaneeli omast;
- 3) soodne kandeva: 6...8 m, kergete liimpuidust talade puhul isegi 12 m;
- 4) lihtsasti lahendatavad tavaliste puittalade niiskusprobleemid; betoon



Joonis 12. Komposiidina töötav terasvarrastega eelpingestatud liimpuidust liittala, kasutatav näiteks sillatalana.



Joonis 13. Komposiitkonstruktsioonina töötav Tartu laululava koorik(ripp)katuse: koos töötavad $\varnothing 30$ mm, 1,5 m sammuga eelpingestatud terasvarrastest võrk ja kolmekihiline puitkoorik. Kontuuriks on kohati betooniga täidetud 1220 mm läbimõõduga terastoru.



Joonis 14. Tartu laululava koorik(ripp)katuse katmine PVC-kattega.

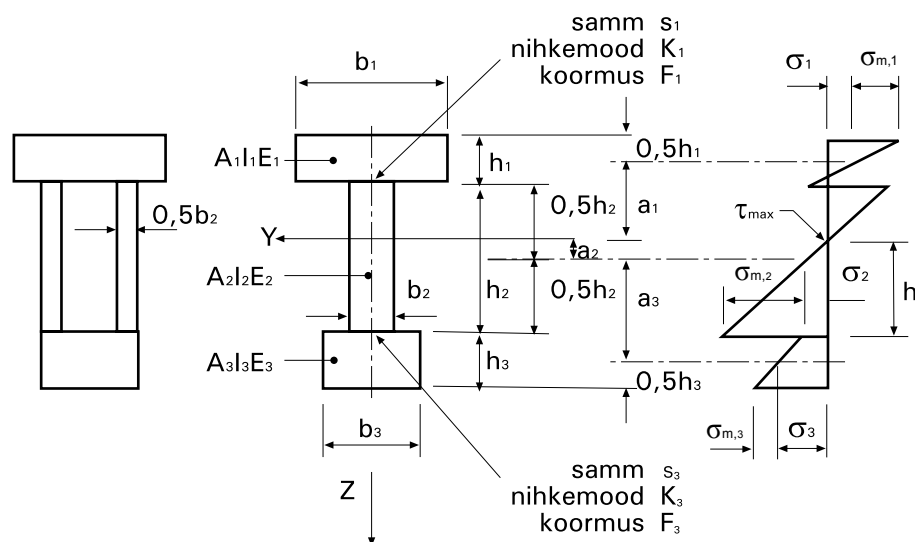
on niiskuskindel ja hea kinnitusalus hüdroisolatsioonile (vannitoad, saunad jne);

- 5) on soodne ka lamekatuste paneelide valmistamiseks;
- 6) betoonalus on suhteliselt väikeste deformatsioonidega ja seetõttu hea kõikvõimalike põrandakattematerjalide paigaldamiseks ja tööks;
- 7) sobib ka ripplae kinnitamiseks alt (nt kipsplaadid);
- 8) ei esine tavalisele puitpõrandale omast nagisemist;
- 9) suhteliselt lihtne on teha ka eelrõusuga elemente;
- 10) paneel on liitkonstruktsioon (komposiit), kus puit võtab vastu tõmme ja paine ning betoon survet. Võrreldes puittaladega (ribidega) on kandevõime 2...3-kordselt ja jäikus 5...10-kordselt suurem. TTÜ-s läbiviidud katsetes 6 m avaga (3 tala 220×60 mm, betoonplaat 50 mm) oli purustav koormus üle 12 kN/m^2 ;
- 11) kerge on konstrueerida ja teha kõvatavat põrandat, paigaldada kõikvõimalikke torusid, juhtmeid jms.

Puit-betoonisildade eelistena võib lisada veel järgmisi asjaolusid:

- saab ehitada kiiremini kui lihtsalt monoliitbetoonist või raudbetoonist;
- pole vaja raketisi, tänu millele kulud vähenevad, silla talad saab kohe paika panna ja ehitusega edasi minna;
- pole terrassildadega kaasnevaid korrosiooniprobleeme;
- lihtne remontida või vajadusel demonteerida.

Joonisel 11 esitatud sisseliimitud profileeritud varrastega armeeritud liimpuittala kandevõimet /9/ võib tala sama kõrguse puhul tõsta normaalse armeeringu korral 30...40%. Samas niisuguse tala valmistamine on ligikaudu 10% tömahukam. TTÜ ehitusteaduskonnas oleme teinud katseid taladega (valmistatud Põlva liimpuidutehases), mille tõmmatavad tsoonis saavutas armatuurteras voolupiiri, ilma et oleks esinenud liimvuugi purunemist või armatuurvarraste nihet tala otstes. Huvitav on märkida, et vaatamata sellele, et katsetala oli pikka aega (ligi 20 aastat) seisnud juhuslikes ja niisketes kohtades, oli ta säilitanud oma kandevõime ja sarrusterase nake ei olnud vähenenud. Selliseid talasid on otsarbekohane kasutada kohtades, kus ehi-



Joonis 15. EVS 5-1-1 (vt lisa B) esitatud arvutuskeem.

tuskõrgus on piiratud, kuid samas mõjuvad koormused on suured.

Joonisel 12 esitatud eelpingestatud liimpuidust liittala /5, 6, 7/ kandevõime ja jäikus kasvavad oluliselt. Samas tuleb tunnistada, et TTÜ-s läbiviidud katsed liimpuitlala paraboolsesse kanalisse paigaldatud eelpingestusvardaga ei andnud oodatud tulemusi. Üks põhjus on selles, et pingestades niisuguse vardaga tala otstest, varda eelpingejõud tala keskel hõõrde tõttu oluliselt kahaneb (kuni 3-kordselt), kui see varras või tross ei ole just plasttorus ja õli sees. Teine negatiivne asjaolu on see, et kui eelpingejõudu ehitises järelpingestamisega ei korrigeerita, siis kaob puidu järeldeformatsioonide (roome) tõttu märkimisväärne osa (30...50%) eelpinge efektist.

Joonisel 13 ja 14 on esitatud Tartu laululava komposiitkonstruktsioonis katuse kõigepealt paigaldati terasvarrastest vähese eelpingestusjõuga võrk, mis sai «raketiseks» kolmekihilise puitkooriku ehitamisel. Lõpptulemusena töötavad nii terasvarrastest võrk kui kolmekihiline puitkoorik koos. Ja kui algselt kandis puitkoorik umbes 2/3 ja terasvarrastest võrk 1/3 koormusest, siis pikema aja jooksul toimub puitkooriku järeldeformatsioonide tõttu koormuste ümberjaunemine nii, et kumbki osa kannab umbes 50% koormusest.

Komposiitkonstruktsioonide projekteerimisest

Komposiitkonstruktsioonide arvutamine on mitmes mõttes problemaatiline, sest arvesse tuleb võtta tegelikkuses küllaltki

suurtes piirides muutuvaid parameetreid, nagu deformatsiivsete sidemete liuge-moodulit ja erinevate materjalide elastsusparameetreid, millest lõpptulemus sõltub oluliselt. Samuti ei ole kasutada laiemalt tunnustatud arvutusprogramme. Puitkonstruktsioonide standardites EVS 1995-1-1 (lisa B) ja EVS 1995-2:2003 on küll esitatud meetodid ja eeskirjad selliste konstruktsioonide arvutamiseks, kuid kahjuks esineb selliseid valemite, mida otse tuletada ei saa. Kohati on ka skeemid halvasti loetavad.

Allpool on esitatud standardi EVS-EN 1995-1-1:2005 lisa B toodud arvutuskeem ja valemid. Skeemil märgib kriips-punkt-joon iga liidetava elemendi raskuskeset läbivat joont. Y-telg on kogu komposiitlala ristlõike nulljoon, mille kaugus keskmise elemendi nulljoonest, s.o a_2 määratakse valemiga B6. Kui Y-telje asukoht on määratud, arvutatakse a_1 ja a_3 . Siinkohal tulebki märkida, et valem B9 annab liite vuugis suurema nihkepinge kui teoreetiliselt (lineaarse teooria kohaselt) arvutades tuleb, kuid nähtavasti on normi tegija, arvestades arvutuste ebamäärasust, tahtnud saada tulemusi tagavara kasuks (kohati liiga paljugi, nii et liite dimensioonid kipuvad tulema liiga suured). Puitsildade standard /vt 2/ esitab lisaks skeemi (vt jn 16) ja lubab teataval juhul võtta liite tugevuse EVS-EN 1995-1-1:2005-ga võrreldes 20% suuremana ja liite jäikuse 100% suuremana. Kui aga betooni ja puidu vahele jääb mingi mittekonstruktiiivne vahekiht, siis tuleks liite tugevus- ja jäikusparameetrid määrata spetsiaalse arvutuse või katsete abil.

Komposiitkala jäikus

$$(EI)_{ef} = \sum_{i=1}^3 (E_i I_i + \gamma_i E_i A_i a_i^2) \quad \text{B.1}$$

Ühikuta suurus

$$\gamma_i = \left[(1 + \pi E_i A_i s_i / (K_i l^2)) \right]^{-1}$$

kui $i=1$ ja $i=3$ B.5

$$a_2 = \frac{\gamma_1 E_1 A_1 (b_1 + b_2) - \gamma_3 E_3 A_3 (b_2 + b_3)}{2 \sum_{i=1}^3 \gamma_i E_i A_i} \quad \text{B.6}$$

$K_i = K_{ser,i}$ kasutuspiiriseisundi arvutustes;
 $K_i = K_{u,i}$ kandepiiriseisundi arvutustes

Normaalpinged määratakse valemitega

$$\sigma_i = \frac{\gamma_i E_i a_i M}{(EI)_{ef}} \quad \text{B.7}$$

$$\sigma_{m,i} = \frac{0,5 E_i b_i M}{(EI)_{ef}} \quad \text{B.8}$$

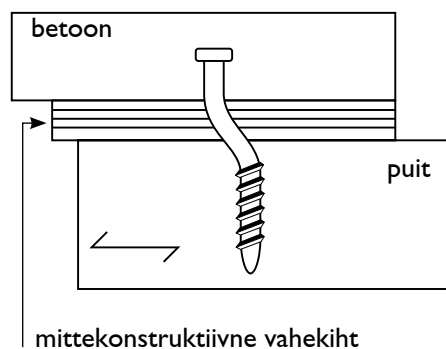
Maksimaalne nihkepinge

$$\tau_{2,max} = \frac{\gamma_3 E_3 A_3 a_3 + 0,5 E_2 b_2 h_2^2}{b_2 (EI)_{ef}} V \quad \text{B.9}$$

Liite koormus

$$F_i = \frac{\gamma_i E_i A_i a_i s_i}{(EI)_{ef}} V \quad \text{(B.10)}$$

kus $i = 1$ ja 3 , asjaolule vastavalt
 $s_i = s_i(x)$ on kinnituselementide vahekaugus



Joonis 16. Puitsilla normides EVS 1995-2:2003 esitatud nihkesideme töötamise skeem

Esitatud arvutusvalemide võib kasutada ka selliste liitkonstruktsioonide arvutamisel nagu laudadest koostatud kolmekihilised paneelid, näiteks hoonete jäikusdiafragmad, paindele töötavad plaadid jne. Silmas peetakse peaaegjalikult üksteisega risti asetsevate kihtidega omavahel kokku liimitud kihte. Juhul, kui paindemoment mõjub äärmiste kihtide laudade suunas ja keskmise, äärmistega ristiasuvas suunas lauakihi suhtes mõjub nihkejõud risti keskmise kihi laudade suunaga, kuid kiududega paralleelsel pinnal, on keskmise lauakihi suhtes tegu uutes normides käsitletava nihkejõuga ehk nihkepingetega, millist inglise keeles nimetatakse *rolling shear*. Varasemates normides seda probleemi sel määral ei käsitletud. Küsimusega on tegeldud mitmel pool, näiteks Saksamaal Cottbusis Brandenburgi Tehnikaülikoolis (vt /8/), kus uuriti sellise nihke puhul kuusepuidust materjali käitumist (nii tugevust kui nihkemoodulit) ja leiti, et kirjeldatud purunemine (keskmises lauakihis) toimub üldiselt hapralt ja aastaringide joonel.

Kokkuvõte

Puidust ja puidupõhistest elementidest ning teistest materjalidest omavahel liidetud ja koormuse kandmisel koos toimivatel komposiitkonstruktsioonidel on tavaliste puitkonstruktsioonidega võrreldes hulk eeliseid, sest iga komposiidis osaleva materjali saab panna tööle tema omadustele sobival viisil, näiteks betoon survele, puit tõmbele ja paindele ning teras tõmbele ja lõikele. Seega kokkuvõttes saab komposiitkonstruktsioonide valmistamisel ja kasutamisel säästa materjali ning saavutada samade parameetrite juures suurem kandevõime ja jäikus, samuti minimeerida vajadust mittekohalike materjalide järele. Sageli õnnestub elementide koostööd arvestades vähendada konstruktsiooni massi või lihtsustada nende valmistamist. Näiteks puidust talade ja raudbetoonist dekiplaadiga silla puhul langeb ära raketiste ja tellingute vajadus. Eriti lihtne on renoveerimisel tõsta vana puitlae kandevõimet ja muid ekspluatatsiooniomadusi.

Kasutatud kirjandus

1. EVS-EN 1995-1-1:2005, Puitkonstruktsioonide projekteerimine. Osa 1-1: Üldist. Üldreeglid ja reeglid hoonete projekteerimiseks
2. EVS 1995-2:2003, Puitkonstruktsioonid. Osa 2: Puitsillad
3. TP Laata, Naulalevylattia, jossa on puu - ja betonilattian edut. Insinööritoimisto Tuomo Poutanen KY
4. Risto Mäkipuro, Aarne Jutila, *Analysing Methods of a composite Girder containing wood*, Nordic Timber Bridge Project, Wood-concrete Composite Bridges, Helsinki University of Technology Laboratory of Bridge Engineering, 1999
5. Sami Nopponen, Aarne Jutila, *Wood-Concrete Composite Bridges*, Nordic Timber Bridge Project, Wood-concrete Composite Bridges, Helsinki University of Technology Laboratory of Bridge Engineering, 1999
6. Sami Nopponen, Aarne Jutila, *Wood-Concrete Composite Bridges*, Nordic Timber Bridge Project, Formwork and Falsework construction, Helsinki University of Technology Laboratory of Bridge Engineering, 1999
7. Jarmo Tommola, Lauri Salokangas, Aarne Jutila, *Wood-Concrete Composite Bridges*, Nordic Timber Bridge Project, Test on shear Connectors, Helsinki University of Technology Laboratory of Bridge Engineering, 1999
8. Dr.-Ing. Andreas Schwar, *Successive failure behaviour of glued multilayered timber structures subjected to high rolling shear stress into the cross lying boards layers*, loeng seminaril TTÜ-s, juuni 2006
9. K. Öiger, E. Just, A. Just *Experimental and Theoretical Analysis of Reinforced Glulam Beams*, Proc. IABSE Conference, Lahti 29-31.8.2001
10. K. Öiger, *Analysis and Realization of Composite Roof Shells*, International Symposium on Theory, Design and Realization of Shell and Spatial Structures, Extended Abstracts, IASS 2001, Oct 9-13, 2001, Nagoya, Japan, pp. 414-415, CD with full papers.