

Veekindlate niiskusandurite ühenduste arendamine puidu pikaajaliseks seireks (Katsearuanne)

1. Sissejuhatus

Doktoritöö raames ehitatakse kolm laudtee katselõiku, milles kasutatakse erinevaid puitmaterjale. Eesmärk on pikaajaliselt ja pidevalt seirata erinevate puittoodete niiskussisaldust välitingimustes. Usaldusväärsete niiskusemõõtmiste eelduseks on andurite ühendused, mis säilitavad veekindluse hoolimata kokkupuutest vihma, seisva vee, pinnaseniiskuse ja muutuvate ilmastikutingimustega.

Käesoleva uuringu eesmärk oli välja selgitada pikaajaliseks välitingimustes kasutamiseks kõige sobivamad kruvielektroodid ja andurite ühendusmeetodid. Uuring viidi läbi tegevusuuringu (action research) põhimõttel, koosnedes korduvatest planeerimisest, katsetamisest, vaatlemisest ja reflekteerimisest tsüklitest. Iga katseetapi tulemusi kasutati anduri konstruktsiooni täiustamiseks enne järgmise arendusetapi juurde liikumist.

2. Materjalid ja meetodid

2.1. Tsükkel 1 – kruvielektroodi valik

Uuringu eesmärk oli välja selgitada, millised kruvielektroodid ja ühenduste lahendused tagavad parima veekindluse. Puidust katsekehad kaeti paadilakiga, et minimeerida vee imendumine lühiajalise vee hoidmise ajal. Seetõttu eeldati, et mõõdetud niiskussisalduse muutused tulenevad eelkõige niiskuse tungimisest puidu elektroodi ja puidu vahelt, mitte puidu enda niiskussisalduse muutumisest. Sellest tulenevalt võis mõõdetud puidu niiskussisalduse olulist muutust pärast vee hoidmist käsitleda märgina vee sissetungimisest kruvi või ühendussüsteemi kaudu. Eelistatud lahenduseks loeti seega see, mille puhul oli puidu mõõdetud niiskussisalduse muutus enne ja pärast vee hoidmist kõige väiksem.

Enne niiskusandurite valmistamist viidi läbi rida eelkatseid, et välja selgitada kõige sobivam kruvielektroodi konfiguratsioon. Hinnati mitut kaubandusvõrgus saadaolevat erinevat tüüpi ja mõõtmetega lamepeaga puidukruvi. Iga kruvi vars isoleeriti liimiga termokahaneva toruga, jättes keermega otsast 5 mm katmata. Nii tagati elektriline kontakt ainult ettenähtud mõõtepunktis.

Selline lahendus põhineb varasemates puidu niiskussisalduse takistusmeetodil mõõtmise uuringutes kasutatud elektroodidel. Otten et al. (2017) kasutasid elektroode, mille puhul eemaldati isolatsioon elektroodi otsast 5 mm ulatuses, jättes ülejäänud elektroodi isoleerituks. Samas uuringus kasutati puidu niiskussisalduse mõõtmiseks ka osaliselt isoleeritud kruvisid ning leiti, et erinevate kasutatud elektrooditüüpide vahel olid mõõtetulemuste erinevused tühised.

Isoleeritud kruvid paigaldati paadilakiga kaetud puidust katsekehadesse. Puitu puuriti eelnevalt kruvi läbimõõdule ja isolatsiooni pikkusele vastavad augud, mille järel kruvid keerati täielikult puitu. Iga kruvitüüpi katsetati nii kummist tihendusseibiga kui ka ilma, et hinnata kruvipea ümbruse tihendamise mõju.

Puidu niiskussisaldust mõõdeti otse kruvipeadelt, kasutades takistusmeetodil töötavat niiskumõõturit Gann Hydromette HT85T. Pärast esialgseid mõõtmisi asetati katsekehad üheks tunniks vette ning seejärel korraldati niiskumõõtmisi. Kuna puidu pinnad olid paadilakiga kaetud, eeldati, et puidu tegeliku niiskussisalduse muutus vees hoidmise ajal on minimaalne. Seetõttu tõlgendati mõõdetud niiskussisalduse olulist suurenemist vee sissetungimisena kruvi paigalduskoha kaudu või ebapiisava elektrilise isolatsiooni tulemusena, mitte vee imendumisena puitu. Lõpliku andurilahenduse jaoks valiti kruvitüüp, mille puhul oli mõõdetud niiskussisalduse muutus enne ja pärast vees hoidmist kõige väiksem.

Kuue kruvikonfiguratsiooni toimivust hinnati enne ja pärast ühe tunni pikkust vees hoidmist. Suurim mõõdetud niiskussisalduse suurenemine esines kummist tihendusseibiga Clint 3,5 × 40 mm kruvi puhul (16,4%-lt 39,8%-le). Seevastu kummist tihendusseibiga Würth A2 5 × 40 mm kruvi puhul oli muutus kõige väiksem (14,8%-lt 18,1%-le). Nende tulemuste põhjal valiti järgmiseks arendusetapiks kummist tihendusseibiga Würth A2 5 × 40 mm kruvi.



Foto 1 Kruvielektroodide valik

Tabel 1. Kruvielektroodide mõõtmistulemused enne ja peale vees hoidmist

		Algne niiskussisaldus (%)	Niiskussisaldus (%) pärast vees leotamist	Muutus
1.	Clint 3,5x40 roostevabast terasest universaalkruvi kumera peaga, kummist tihendusseibiga	16,4	39,8	23,4
2.	Clint 3,5x40 roostevabast terasest universaalkruvi kumera peaga, ilma kummist tihendusseibita	15	20,6	5,6
3.	Clint 4x40 roostevabast terasest universaalkruvi kumera peaga, kummist tihendusseibiga	15,6	33,1	17,5
4.	Clint 4x40 roostevabast terasest universaalkruvi kumera peaga, ilma kummist tihendusseibita	14	19,9	5,9
5.	Würth 5x40 roostevabast terasest universaalkruvi kumera peaga, kummist tihendusseibiga	14,8	18,1	3,3
6.	Würth 5x40 roostevabast terasest universaalkruvi kumera peaga, ilma kummist tihendusseibita	12,2	22,4	10,2

2.2. Tsükkel 2 - anduri konfiguratsiooni arendamine

Pärast elektroodide valimist valmistati mitu andurikonfiguratsiooni ning hinnati nende veekindlust. Andurid koosnesid kahest roostevabast terasest kruvielektroodist (5×40 mm). Kruvide varred isoleeriti liimiga termokahaneva toruga, jättes keermega otsast 5 mm katmata. Kruvipeade juurde paigaldati rõngasklemmid ja kummist tihendusseibid ning elektroodid ühendati kaabliga, kasutades pressühendusi, mis kaitsti termokahaneva toruga.

Katsetati erinevaid ühenduslahendusi, sealhulgas otse puitu paigaldatud andureid ning lahendusi, mille puhul elektriühendused paiknesid silikooniga tihendatud IP65 kaitseastmega harukarbis. Samuti hinnati erinevaid kaablimaterjale ja tihenduslahendusi nii kummist tihendusseibidega kui ka ilma.



Foto 2 Ühenduslahendus nr 1 - andur on veega täidetud harukarbis

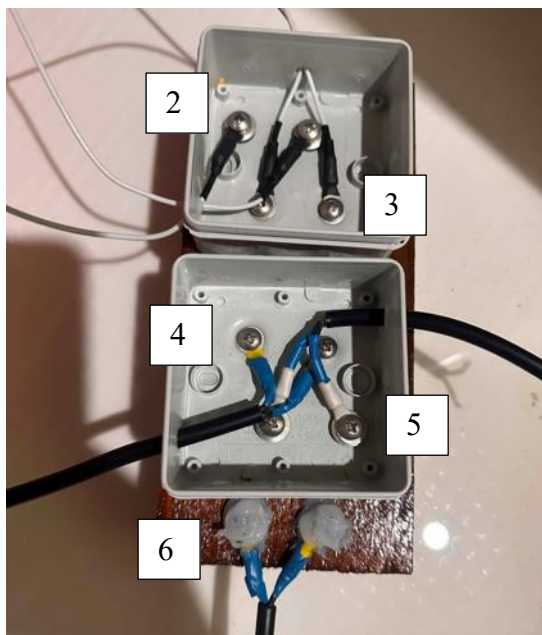


Foto 3 Ühenduslahendused nr 2-5. Nr 2 - harukarbis, kummiseibiga, teflonkaabliga. Nr 3 - harukarbis, seibita, teflonkaabliga. Nr 4 - harukarbis, seibiga, UV-kindl PVC kaabliga. Nr 5. harukarbis, seibita, UV-kindla PVC kaabliga. Nr 6 harukarbita seibiga

Katsetati kuut terviklikku andurikonfiguratsiooni. Otseühendusega anduri puhul mõõdetud niiskussisaldus pärast vees hoidmist praktiliselt ei muutunud (13,5%-lt 13,6%-le), samas kui IP65 kaitseastmega harukarpi kasutavad lahendused ei parandanud veekindlust järjepidevalt. Sõltuvalt kasutatud kaablist ja tihenduslahendusest suurenes mõõdetud niiskussisaldus pärast vees hoidmist 14,5–21,5%-ni.

Tabel 2. Anduriühenduste mõõtmistulemused enne ja pärast vees hoidmist

		Algne niiskussisaldus (%)	Niiskussisaldus (%) pärast vees leotamist	Muutus
1.	Anduri ühendus vees	13,5	13,6	0,1
2.	Teflonkaabel seibiga, IP65 harukarbis	13,5	19,9	6,4
3.	Teflonkaabel ilma seibita, IP65 harukarbis	7	15,3	8,3
4.	UV-kindel PVC-kaabel seibiga, IP65 harukarbis	7,2	21,5	14,3
5.	UV-kindel PVC-kaabel ilma seibita, IP65 harukarbis	13,7	14,5	0,8
6.	UV-kindel PVC-kaabel seibiga, ilma IP65 harukarbita	12,1	14,5	2,4

Niiskussisalduse stabiilsusel põhinev hindamismeetod osutus tõhusaks, kuna lakitud puit piiras vee imendumist. Mõõdetud niiskussisalduse väike muutus pärast vees hoidmist näitas, et tihenduslahendus takistas edukalt vee sissetungimist. Kruvide katsetamise tulemused võimaldasid välistada vähem stabiilsed kruvikonfiguratsioonid ning valida edasisteks katseteks kõige paremini toiminud anduriühenduse.

Andurite katsetamise tulemused näitasid, et konstruktsiooni keerukamaks muutmine ei parandanud tingimata veekindlust. Kuigi IP65 kaitseastmega harukarp on ette nähtud kaitsma ühendusi väliskeskkonna mõjude eest, ei näidanud praktilised katsed selle selget eelist võrreldes lihtsama tihendatud ühenduslahendusega. Tulemused näitavad, et veekindlus sõltub rohkem elektroodide ja kaabli ühenduskohtade tihendamise kvaliteedist kui täiendava välise kaitsekarbi kasutamisest.

Täiendav valideerimiskatse kinnitas tõlgendust, et registreeritud niiskussisalduse muutused tulenesid eelkõige ühenduslahenduse toimivusest, mitte vee kontrollimatust imendumisest puitu. Tihendusseibide kasutamine oli oluline nii veekindluse tagamiseks kui ka selleks, et mõõtmised toimuksid puidus ettenähtud sügavusel.

IP65 kaitseastmega harukarpe ei valitud edaspidiseks kasutamiseks, kuna need muutsid paigaldamise keerukamaks, kuid ei andnud mõõdetavat eelist. Seetõttu pakub lõplik andurilahendus parimat kombinatsiooni veekindlusest, mõõtmiste usaldusväärsusest, paigaldamise lihtsusest ja kontrollitavusest erinevate puitmaterjalide niiskussisalduse pidevaks seireks katselisel laudteelõigul.

2.3. Tsükkel 3 – pikaajaline valideerimine

Järgmise etapina katsetati andurikonfiguratsioone pikemaajalisel kokkupuutel veega. Eesmärk oli jälgida andurite toimivust 24 tunni jooksul, mõõtes niiskussisaldust iga 8 tunni järel. Varasemates lühiajalistes katsetes vähendas puidust katsekehade katmine paadilakiga tõhusalt vee imendumist. Pikema katseperioodi puhul ei osutunud paadilakk aga piisavalt veekindlaks, mistõttu ei olnud võimalik eristada anduriühenduse kaudu toimuvat vee sissetungimist puidu enda niiskussisalduse suurenemisest.

Seetõttu töötati pikaajaliseks katseks välja muudetud katsemeetod. Andureid katsetati IP65 kaitseastmega harukarpides, mille põhi oli eemaldatud. Harukarbid tihendati ühekomponentse silaanmodifitseeritud liimhermeetikuga Kiilto Masa ning andurid paigaldati läbi hermeetikukihi puidust katsekehasse. Esmalt mõõdeti puidu esialgne niiskussisaldus. Seejärel täideti andureid ümbritsevad harukarbid veega ning niiskussisaldust mõõdeti iga 8 tunni järel 24 tunni jooksul. Ka selle katse puhul puitu imendus vett ja puidu niiskussisaldus muutus oluliselt suuremaks,

Tabel 3. Mõõtetetulemused

		Algne niiskussisaldus (%)	Niiskussisaldus (%) pärast vees leotamist			
			8 h	16 h	24 h	32 h
1.	Anduri ühendus vees	15,3	66	30,1	15,5	14,5
2.	Anduri ühendus vees	15,5	16	19,9	24,1	27,8

Kuna esimese anduri ühenduse niiskussisalduse näit oli pärast 8 tundi vees leotamist kõrge, eeldati, et ühendus või isolatsioon lekib. Seetõttu valati vesi esimesest harukarbist välja, et vältida puidust katsekeha niiskussisalduse suurenemist.

3. Järeldus

Varasemates uuringutes on puidu niiskussisalduse takistusmeetodil mõõtmiseks kasutatud nii isoleeritud roostevabast terasest elektroode kui ka osaliselt isoleeritud kruvisid (Brischke & Lampen, 2014; Otten et al., 2017). Otten et al. (2017), mis näitasid, et osaliselt isoleeritud kruvielektroodid võimaldavad elektrilise takistuse mõõtmist võrreldavalt teiste elektrodilahendustega. Pikaajalisel välitingimustes seirel on siiski oluline tagada mitte ainult elektroodi elektriline isolatsioon, vaid ka ühenduskoha kaitse vee sissetungimise eest. Käesolevad katsed keskendusid seetõttu kruvielektroodi ja kaabliühenduse tihendamisele ning näitasid, et lihtne nõuetekohaselt tihendatud ühendus võib olla vähemalt sama tõhus kui keerukam IP65 kaitsekarbil põhinev lahendus.

4. Valmis lahendus

Valmislahendusena kasutatakse puidu niiskussisalduse takistusmeetodil mõõtmiseks kahest osaliselt isoleeritud A2 roostevabast terasest kruvielektroodist koosnevaid andureid. Sõltuvalt mõõtesügavusest kasutatakse 4×20 mm või 5×40 mm kruvisid, mille vars kaetakse liimiga termokahaneva hülsiga nii, et kruvi ots jääb ligikaudu 5–7 mm ulatuses katmata. Elektroodidele paigaldatakse UV kindla PVC kattega kaabliga ühendatud kaabliking ja kummist tihendusseib.

Elektroodid paigaldatakse puitu 30 mm vahekaugusega eelpuuritud avadesse. Vee sissetungimise vähendamiseks tihendatakse puidu ja kummiseibi vahe silikooniga. Kaabel ühendatakse elektroodide kaablikingadega pressühenduse abil, ühenduskoht kaitstakse termokahaneva hülsiga ning kruviühendus kaetakse täiendavalt silikooniga.

5. Kasutatud kirjandus

Brischke, C., & Lampen, S. C. (2014). Resistance based moisture content measurements on native, modified and preservative treated wood. *European Journal of Wood and Wood Products*, 72(2), 289–292. <https://doi.org/10.1007/s00107-013-0775-3>

Otten, K. A., Brischke, C., & Meyer, C. (2017). Material moisture content of wood and cement mortars – Electrical resistance-based measurements in the high ohmic range. *Construction and Building Materials*, 153, 640–646. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.090>