

## JÄÄN VAHVISTAMINEN VETOAKESTÄVÄLLÄ AINEELLA

Juhani Karri

Rakenteiden Mekaniikka Vol. 12  
No 4. 1979 s. 33-41

**YHTEENVETO:** Artikkelissa käsitellään jään vahvistamista vetoakestävällä materiaalilla. Aluksi esitellään eräitä yleisiä näkökohtia jään kantokyvystä. Käytännön vahvistamismahdollisuuksien selvittämiseksi VTT:n rakennetekniikan laboratoriossa on tehty vertaileva koesarja jään vahvistamisesta lasikuidulla. Koesarjan tuloksia esitetään tässä kirjoituksessa. Lisäksi referoidaan lyhyesti eräitä muissa maissa tehtyjä kokeita jään vahvistamisesta.

### JOHDANTO

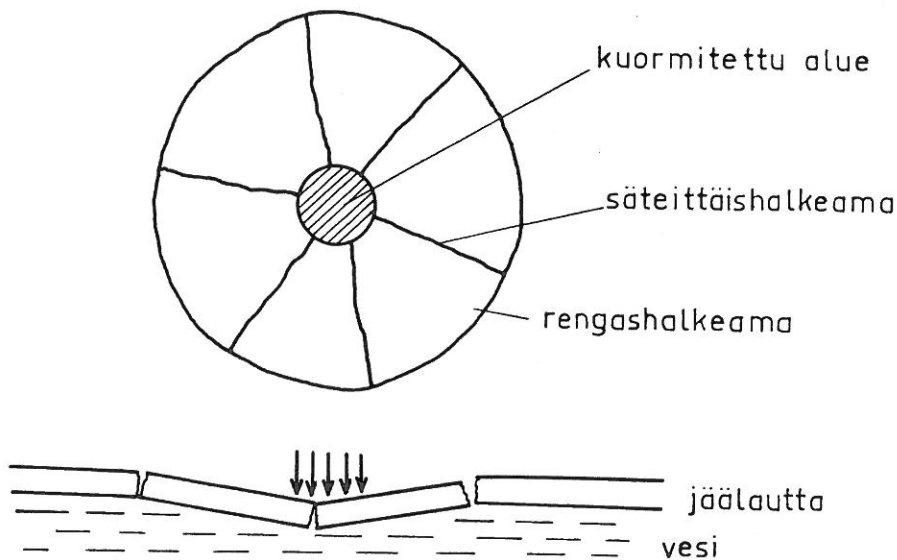
Jään kantokykyä on kauan käytetty hyväksi vesistöjen ylityksessä jäätä pitkin. Myös metsäteiden kantavuus talvella on usein suurelta osin jään tai jäätyneen maan varassa. Jäätä voidaan myös käyttää tilapäistuentana tai rakennusalustana veteen tai pehmeälle maalle rakennettaessa. Jäälle voidaan myös tilapäisesti varastoida tavaraa.

Jäälaatan kantavuutta on yleensä arvioitu kimmoisella alustalla olevan laatan teorialla. Ehjää jäälaattaa on käsitelty äärettömänä laattana ja halkeillutta sektorilaattana. Jään lujuusominaisuuksien suuren hajonnan ja jäässä esiintyvien vikojen vuoksi käytetyissä lujuusarvoissa joudutaan soveltamaan huomattavan suuria varmuuksia.

Koska kantava jäälaatta on yleensä varsin laaja paksuuteensa verrattuna, määräytyy jään kantokyky taivutuslujuuden perusteella. Koska jään puristuslujuus on huomattavasti suurempi kuin vetolujuus, jään taivutusvetolujuus määrää jäälaatan kantokyvyn.

Jään taivutusmurtuma on hauras. Kun jää halkeaa vetopuolelta, halkeama kehittyy välittömästi koko jään läpi korkeussuunnassa, eikä haljenneella kohdalla enää ole lainkaan taivutuskapasiteettia. Kun riittävästi halkeamia on kehittynyt murtomekanismin syntymiseksi, tapahtuu lopullinen murto ellei jää ole niin paksua, että siinä esiintyy huomattavaa holvaantumista. Kuvassa 1 on esitetty tyypillinen murtokuvio jäälaatatassa.

Ensimmäiset halkeamat syntyvät kuvan 1 tapauksessa säteettäisinä kuormasta pois päin. Syntyvät sektorilaatat kantavat kuorman ulokkeina, kunnes ulokkeissa ylitetään jään taivutusvetolujuus yläpinnassa ja syntyy rengasmainen halkeama, jolloin murtomekanismi on valmis.



Kuva 1. Eräs jäälaatan murtomekanismi.

Jään lujuusominaisuuksien suuren hajonnan, satunnaisten paksuusvaihteluiden ja halkeamien sekä murtumisen haurauden vuoksi sallittuja kuormia arvioidessa on käytettävä suuria varmuuskertoimia. Lähteen /1/ mukaan esimerkiksi TVH:n ohjeiden mukainen sallittu kuorma jääteillä on n. 1/5 ehjän jäälevyn kantokyvystä.

Jään kantavuutta on vanhastaan lisätty jäädyttämällä jääkuori paksummaksi. Auraamalla lumi pois jäätien päältä poistetaan sen lämpöä eristävä vaikutus ja jään paksuus kasvaa nopeammin. Epätasainen jäätyminen aiheuttaa jäähän tällöin usein railoja, joista purkautunut vesi jäätyessään paksuntaa vielä jäätä. Tässä mielessä jäähän voidaan tehdä myös avantoja, joista vesi pääsee jäälle. Jäätä on myös ennen vahvistettu sirottelemalla sen päälle olkia, jotka sitten on jäädytetty jään sisälle.

Jos jään murtotapa saataisiin sitkeämmäksi ja hajontaa pienennetyksi, niin ensimmäisten halkeamien syntyminen ei aiheuttaisi välittömästi vaaraa lopullisesta murtumisesta. Tällöin jään kantokykyä voitaisiin käyttää hyväksi turvallisemmin ja kenties pienentää käytettäviä varmuuskertoimia.

Valtion teknillisen tutkimuskeskuksen rakennetekniikan laboratoriossa meillä olevan projektin "Rakenteiden jääkuormat" yhteydessä suoritettiin alustava tutkimus jään vahvistamisesta vetoa kestäväällä materiaalilla.

Tutkimus sai alkunsa DI Erik Estlanderin SITRALle esittämän idean pohjalta. SITRAn ja VTT:n edustajien kesken käytyjen keskustelujen tuloksena päätettiin suorittaa joitakin yksinkertaisia kokeita, jotta saataisiin kuva siitä, missä määrin sentapainen jään vahvistaminen on mahdollista, jonka jälkeen voidaan harkita mahdollisia laajempia kokeita suuremmissa mittakaavassa.

#### ALUSTAVAT KOKEET

Muutaman materiaalivaihtoehtoon kokeilemiseksi jäädytettiin pienten

## VARSINAISET KOKEET

Alustavien kokeiden perusteella päätettiin tehdä varsinainen koesarja vertailuna vahvistamattomien ja lasikuidulla vahvistettujen palkkien kesken.

Yhteen palkkiin sijoitettiin vahvistukseksi amerikkalaista lasivillaa, jonka kuidut olivat paksumpia ja pitempiä kuin alustavissa kokeissa käytettyjen kotimaisten lasivillojen.

Koekappaleet jäädytettiin vanerimuotissa, jonka sisämitat olivat 1000 mm x 600 mm x 400 mm. Muotin reunat olivat hieman ulospäin kaltevat jään irtoamisen helpottamiseksi. Muotti oli alta ja sivuilta eristetty 100 mm Styrox-levyillä, jotta jäätyminen tapahtui ylhäältä alaspäin luonnon olosuhteita vastaten. Muotti vuorattiin sisältä polyeteenikalvolla.

Jäädytettävä vesi otettiin vesijohdosta kuumana ja sitä kuumennettiin edelleen uppovastuksilla n. 75 °C lämpötilaan, jotta veteen liuenneet kaasut poistuisivat. Muottiin otettiin vettä n. 320 mm korkeuteen saakka. Jäädytys alkoi veden jäähtyttyä huoneenlämmössä 30 °...40 °C lämpötilaan.

Ennen jäädytystä muottiin asennettiin polyeteeniset poikkiseinät tehtäviä palkkeja erottamaan. Jään sisään jäädytettävät materiaalit kannatettiin levyihin tehtyjen reikien läpi pujotetuilla nylon-siimoilla, joiden väli oli 100 mm.

Jäädytys tapahtui -20 °C lämpötilassa. Kun jäätä oli muodostunut n. 120 mm, jääpalkit irroitettiin ja niitä muotoiltiin käsi- ja vannesahalla sekä höyläämällä. Tehtyjen palkkien pituus oli n. 610 mm. Muut mitat ja käytetyt vahvistusaineet on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Koepalkit

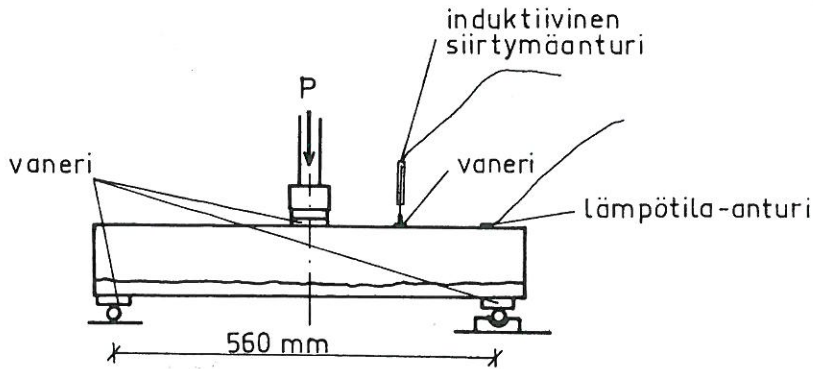
	Palkki	Mitat keskellä palkkia (mm)			vahvistusmateriaali
		B	H	h	
Sarja I	I 1	180	99	-	ei vahvistettu
	I 2	181	98	-	"
	I 3	151	100	-	"
Sarja II	II 1	193	89	koko paksuus	lasivilla (tunnistamaton)
	II 2	169	91	18	2 kpl M512-600 lasikuitumattoa
	II 3	186	103	10...25	1 kpl M512-600 lasikuitumattoa

B = palkin keskimääräinen leveys  
 H = palkin keskimääräinen korkeus  
 h = vahvisteen etäisyys alareunasta

Koepalkkien jää oli silmämääräisen tarkastuksen mukaan homogeenista ja huokosista vapaata.

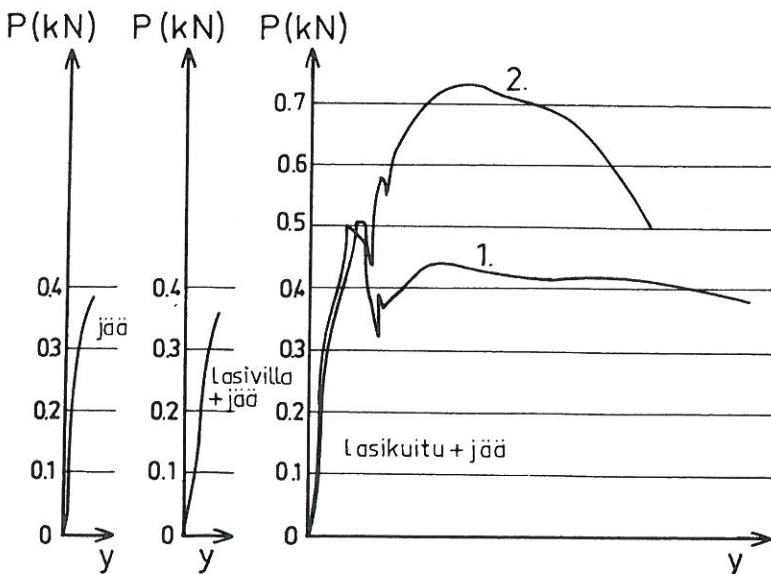
50 mm x 30 mm x 250 mm koepalkkien sisään lämmöneristeinä käytettyä A. Ahlström Oy:n lasivillaa tuotenimi Karhuntaalja (tilavuuspaino 17 kg/m<sup>3</sup>, kuitupaksuus n. 6 µm) ja Otsolevy E (tilavuuspaino 46 kg/m<sup>3</sup>, kuitupaksuus n. 11 µm) sekä kotimaisia, lujitemuoviteollisuuden käyttämiä lasikuitumattoja M512-900 ja M510-600, valmistaja A. Ahlström Oy, Kuitulasi. Lasivillat täyttivät koepalkit kokonaan, lasikuitumattoja asetettiin yksi palkkia kohden.

Kuormitus tapahtui taivuttamalla palkkeja jännevälin ollessa 200 mm. Muutoin kuormitusjärjestely oli kuvan 2 mukainen.



Kuva 2. Kuormitusjärjestely.

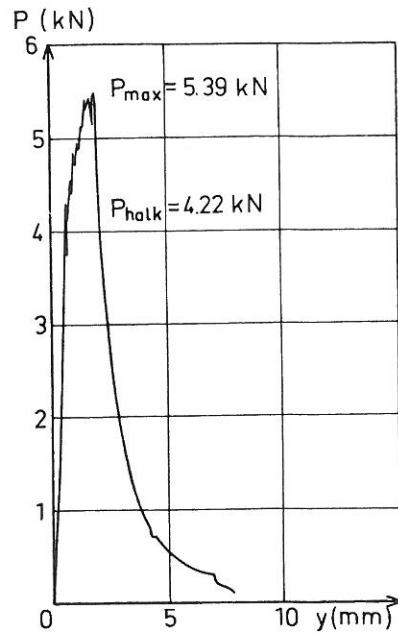
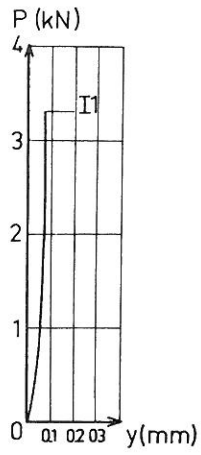
Alustavien kokeiden tuloksena voitiin todeta, että käytetyt lasivillat eivät oleellisesti lisänneet jään lujuutta ja niillä vahvistetun jään murto-tapa oli hauras. Lasikuituvahvisteinen jää murtui sen sijaan sitkeästi. Kuvassa 3 on esitetty neljä tyypillistä kuormitus-muodonmuutoskäyrää erilaisille palkeille.



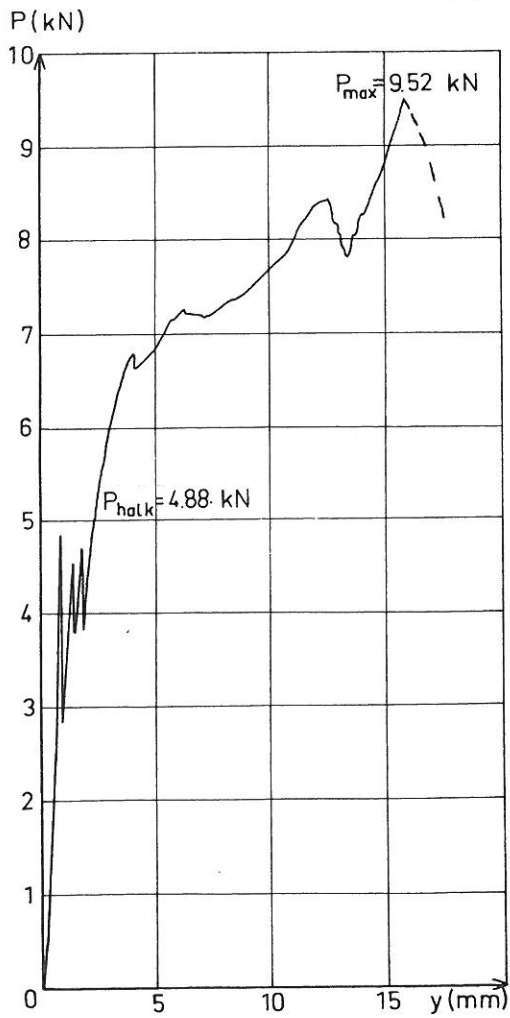
Kuva 3. Alustavien kokeiden mittaustuloksia.

Lasikuitu sijaitsi alustavissa kokeissa melko sattumanvaraisesti palkissa, usein lähellä poikkileikkauksen painopisteakselia, joten niitten toimiva korkeus halkeilleena saattoi olla huomattavasti ehjän palkin korkeutta pienempi.

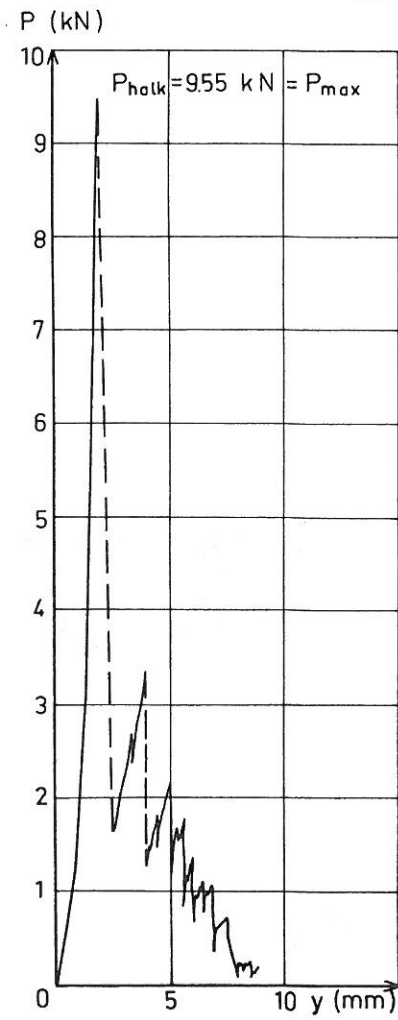
II 1



II 2



II 3



Kuva 4. Kuormitus-taipumakäyrät.

Palkkien pintaan jäädytettiin lämpötila-anturit ja palkkeja säilytettiin -15 °C lämpötilassa, sarjaa I 3 vuorokautta ja sarjaa II 4 vuorokautta.

Palkit kuormitettiin huoneenlämmössä. Kuormituspaikalle ne tuotiin Styrox-laatikossa. Kuormitusjärjestelyt on esitetty kuvassa 2.

Taulukko 2. Koekappaleiden pintalämpötiloja

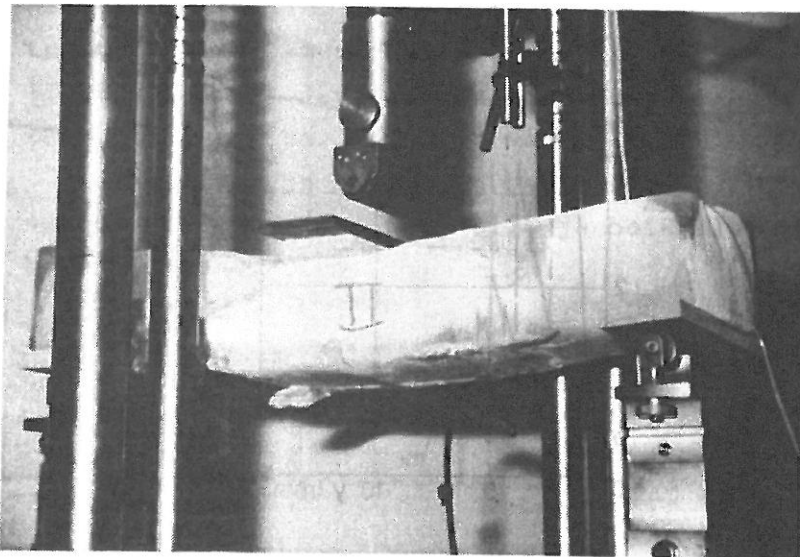
Palkki	Päivä	Kuormituskokeen alku		Kuormituskokeen loppu	
		klo	T <sup>o</sup> C	klo	T <sup>o</sup> C
I 1	7.5.79	13.35	-14,2	13.40	-10,4
I 2	"	13.20	-14,5	13.30	-13,4
I 3	"	12.48	-15,0	12.53	-13,5
II 1	28.5.79	13.28	-7,9	13.34	-6,6
II 2	"	12.20	ei lukemaa	12.27	-4,9
II 3	"	12.57	-14,0	13.11	-11,3

Kokeissa käytettiin kuormitusnopeutta  $\frac{dP}{dt} = 20 \text{ N/s}$ , jota voidaan pitää melko hitaana kuormitusnopeutena.

Havaitut kuormitus-taipumakäyrät sekä halkeilu- ja maksimikuormat on esitetty kuvassa 4. Sarjan I palkkeista on esitetty vain I 1:n taipumakäyrä. Muiden sarjan I palkkien käyrät olivat samanlaiset, maksimikuorma vaihteli.

Murtumistapa pelkästä jäästä valmistetuilla palkkeilla oli selvä: halkeaman ilmestyttyä jänteen keskivaiheille palkki katkesi kahtia.

Lasikuidulla vahvistettujen palkkien murtumistapa muistutti sellaisen teräsbetonipalkin murtumista, joiden uumaa ei ole raudoitettu (haoitettu). Palkin II 2 alapintaan syntyi vetohalkeama ja kuormituskohdasta lähtien uumaan selvä päävinohalkeama, joka avautui kuorman kasvaessa. Murtotapa oli sitkeä (vrt. kuva 4). Kuva 5 esittää palkkia II 2 kuormituksen jälkeen.



Kuva 5. Palkki II 2 kuormituksen jälkeen.

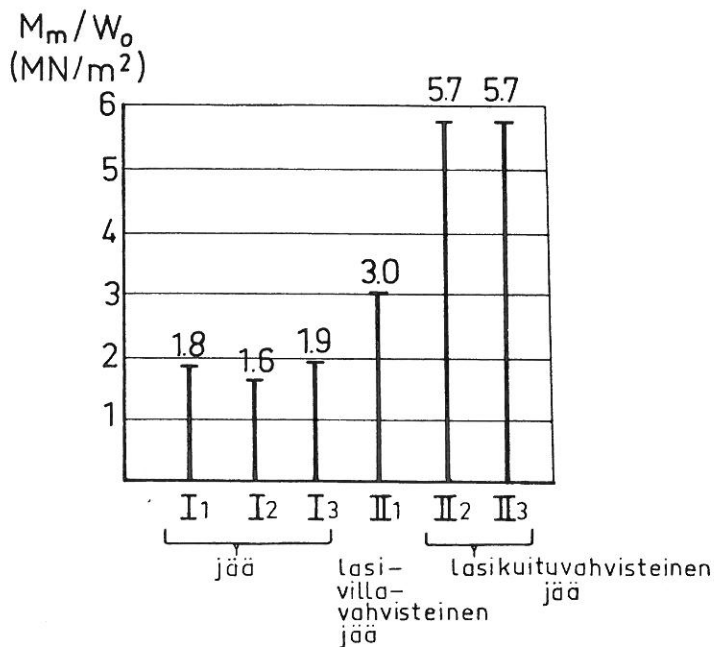
Palkissa II 3 syntyi päävinohalkeama varsin suurella kuormalla, eikä palkki kantanut tämän jälkeen yhtäsuuria kuormia.

Palkki II 1 oli vahvistettu amerikkalaisella lasivillalla. Sen murtuminen tapahtui kuorman kohdalla sijaitsevan taivutushalkeaman avautumisena. Murto oli melko hauras, mutta ei aivan yhtä äkillinen kuin alustavissa kokeissa kotimaisilla lasivilloilla vahvistetuilla palkeilla.

#### TULOSTEN ARVIOINTIA

Tulokset osoittavat, että jään kantokykyä ja murtumistavan sitkeyttä on mahdollista lisätä vahvistamalla jäätä vetoakestävällä materiaalilla.

Saavutettuja murtokuormia on vertailtu kuvassa 6 siten, että kunkin kokeen maksimimomentti on jaettu ehjän palkin taivutusvastuksella  $W = BH^2/6$ . Näin saatu luku esittää vahvistamattomilla palkeilla lineaarisen taivutusteorian (jolloin myös kimmokerroin oletettu vakioksi koko palkin korkeudella) mukaan laskettua reunajännitystä. Vahvistetuille palkeille luku on vertailuarvo, joka kuvaa jännitystä, mikä kyseisellä momentilla esiintyisi ehjän palkin reunassa lineaarisen taivutusteorian mukaan.



Kuva 6. Vertailujännitykset  $M_m/W_0$ . (MN/m<sup>2</sup>).

Lasikuitu on eräs mahdollinen vahvistusmateriaali. Kuitujen suurta lujuutta ei näissä kokeissa saatu täysin käytettyä hyväksi. Palkit taipuivat voimakkaasti puristuspuolen plastisoituessa verrattain hitaassa kuormituksessa, eikä yhdessäkään kokeessa lasikuituvahvisteisilla palkeilla tapahtunut selvää kuitujen katkeamista tai puristuspuolen murtoa. Selvittämättä



jäi myös se, katkeavatko n. 50 mm pituiset kuidut ennen kuin niiden tartunta jäähän pettää.

Lasikuitu on kuitenkin suhteellisen kallis vahvistusmateriaali. Käytännön olosuhteissa jään ollessa huomattavan paksu, useita kymmeniä senttimetrejä, vaaditaan vahvistusmateriaalia huomattavasti enemmän kuin nyt suorite- tuissa kokeissa 10 cm:n paksuisella jäällä. Halvempia ratkaisuja saattaa löytyä esim. tienrakennuksessa käytetyistä maapohjan vahvistusmateriaaleista.

Puuta ja terästä on kokeiltu jään vahvistusmateriaalina sekä Ruotsissa että USA:ssa.

Luulajan korkeakoulussa tutkittiin marras-joulukuussa 1978 järven jään vahvistamista jäädyttämällä jäähän sahattujen ulokepalkkien yläpintaan 1"x1" puurimoja ja 8 mm harjateräksiä /2/. Tulokset näyttivät näissäkkin kokeissa lupaavilta. Vertailujännitykset vahvistetuissa palkeissa olivat 1,6...3,1 kertaiset vahvistamattomaan jäähän verrattuna.

USA:ssa tutkittiin /3/ vuosina 1971-1972 myös jään vahvistamista jäädyttä- mällä jäälaatan sisään puun oksia (halkaisija n. 25 mm), puolipyöreitä puuri- moja (halkaisija n. 14 mm) ja teräsvaijereita. Vahvistetuista jäälaatoista sahattiin sitten ulokepalkkeja, joita kuormitettiin sekä vetämällä ylöspäin että painamalla alaspäin. Jäätä valmistettiin sekä suolattomasta että meri- vedestä. Merivedestä tehdyillä vahvistetuilla palkeilla saatiin keskimäärin 4,3 kertaa suurempia lujuusarvoja kuin vahvistamattomilla palkeilla tapauk- sissa, joissa vahvike oli palkin vetopuolen uloimmassa kolmanneksessa. Ma- kean veden jäällä vastaava suhde oli 3,8. Vahvistettujen palkkien murtumis- tapa oli sitkeä.

VTT:ssa tehdyissä kokeissa ilmeni, että sileäpintainen nylon-siima ei tartu jäähän nimeksikään, vaan lasikuidun kannatukseen käytetyt siimat läh- tevät helposti vetämällä läpi palkin jättäen jälkeensä ehjän pyöreän kanavan. Tämäntapainen vahvike ei näin ollen sovellu jään vahvistukseen olemattoman tartunnan takia.

## LOPPUPÄÄTELMIÄ

Suoritetut kokeet osoittavat, että jään taivutuskapasiteettia on mahdol- lista lisätä vahvistamalla jäätä vetoakestävällä materiaalilla. Vahvistami- sen hyväksikäyttö edellyttäisi laajempia tutkimuksia mm. vahvistetun jään käyttäytymisestä eri kuormitusnopeuksilla ja eri materiaalien tartunnasta jäähän. Vahvistetun jään laskennallinen tarkastelu edellyttäisi myös jään puristuspuolen jännitysjakautuman approksimoimista. Jään kimmokertoimen vaihtelun ja huomattavan viskoelastisuuden johdosta jännityskuvion tarkka arviointi on varsin vaikeaa. Mahdollisissa lisätutkimuksissa tulisi myös tarkastella vahvistetun jään käyttäytymistä toistuvassa kuormituksessa, myös jäädyttämällä palkit uudelleen niiden halkeiltua. Tulosten perusteella voi- taisiin arvioida vahvistetun jäälaatan kuormitettavuutta sen halkeiltua sekä



halkeamien jäädyttyä uudelleen. Jään vahvistaminen käytännön olosuhteissa vaatii omat menetelmänsä. Yläpinnan vahvistaminen käy päinsä jäädyttämällä vahvike olemassa olevan jään päälle. Alapinnan vahvistus vesistöissä voisi tapahtua esim. uittamalla vahvistusmatto jään alitse samaan tapaan kuin verkoja uitetaan avannosta toiseen talvisessa verkkokalastuksessa ja antamalla maton jäätyä kiinni jään alapintaan sen paksuuden kasvaessa.

#### LÄHDEKIRJALLISUUS

- [1] Esa Eranti, Rakenteiden jääkuormat ja jään kantokyky, TVH Vesiosasto 1978 Ins.tsto Erkki Juva Oy
- [2] Crister Cederwal - Lennart Fransson, Förstärkning av ett istäckes bärförmåga med armering. Väg- och vattenbyggaren 3 1979, sivut 43...47
- [3] E.G. Ohstrom, S.L. DenHartog, Cantilever beams tests on reinforced ice CRREL Report 76-7 April 76

*Juhani Karri, dipl.ins., Valtion teknillinen tutkimuskeskus, rakennetekniikan laboratorio*