

## Jäätikkökaivot sulavesien virtaussysteemissä

JUKKA KÄYHKÖ

Eräitä vaikuttavimmista ilmiöistä jäätikön pinnalla ovat jäätikkökaivot eli moulinit (ransk. »mylly»). Kaivon uumeniin ryöppyävän jäätikköjoen kumu antaa viitteitä jäämassan paksuudesta — ja ajatus harha-askeleesta kipristää kulijan vatsanpohjaa.

Jäätikkökaivot ovat otollisia tutkimuskohteita selvitettäessä sulavesien liikkeitä jäätikössä, sillä niiden kautta vesi virtaa jäätikön pinnalta enja subglasiaalisiin uomastoihin. Esimerkiksi merkkiainetta on helppo levittää juuri jäätikkökaivojen kautta. Itse kaivoihin liittyy myös monia mielenkiintoisia kysymyksiä kuten, mihin kaivoja syntyy, miksi ja kuinka suuria.

Jäätiköntutkimuskurssilla ei ollut mahdollisuutta tehdä laajaa kartoitusta Storglaciärenin jäätikkökaivoista sen enempiä kuin merkkiainetutkimuksiakaan jäätikön sisäisten valuma-alueiden selvittämiseksi (ks. esim. Stenborg 1969 ja Holmlund 1988a). Tällaiset tutkimukset vaatisivat useiden viikkojen oleskelun jäätiköllä. Sen sijaan kartoitettiin pieneltä alueelta kymmenen kaivoa, mitattiin niiden syvyydet ja pohdittiin niiden sekä pintauomaston suhdetta ja merkitystä jäätikön hydrologiassa.

### Jäätikön sulavedet

Jäätikön sulavesiä synnyttävät seuraavat tekijät (Drewry 1986: 21):

1. Säteilyn ja latentin sekä aistittavan lämmön aiheuttama pintasulaminen
2. Liikekitkasta ja jäätikön muodonmuu-

toksista syntyvän mekaanisen lämmön aiheuttama sulaminen

3. Geotermisen lämmön aiheuttama sulaminen
4. Pohjavedestä ja ympäristön pintavesistä tuleva valunta
5. Sadanta

Kohdat 1—3 liittyvät veden olotilan muutokseen jäätikössä, kohdat 4 ja 5 vettä sulassa muodossa jäätikölle tuoviin prosesseihin.

Pintasulaminen on useimmiten tärkein sulavelähdettäjä jäätiköllä. Akkumulaatioalueen lumella ja firnillä vesi imeytyy samantien syvemmälle painovoiman ansiosta, kunnes se paineen kasvaessa ja firnin ilmatilojen sulkeutuessa pysähtyy muodostaen kyllästyneen kerroksen firnin alasaan (Hodge 1976: 207).

Sulamiskauden kuluessa firn-alueen reuna satureituu vähitellen vedellä, ja jäätikön pinta sohjoutuu. Samalla alkaa veden virtaus alaspäin, ensin patjamaisena kerroksena, myöhemmin uomissa (Stenborg 1968).

Jäätikönsisäisten muodonmuutosten synnyttämä mekaaninen lämpö sulattaa jäätä, samoin kuin kitkalämpö jäämassan ja alustan rajapinnassa. Mekaanisen lämmön määrä riippuu jäätikön liikenopeudesta. Patersonin (1983: 142) mukaan 20 metrin vuosivauhdilla liikkuva jäätikkö sulaa mekaanisen lämmön vaikutuksesta 6 mm vuodessa. Samansuuruinen on myös geotermisen lämmön keskimääräinen globaalinen sulatusvaikutus. Määrä on kovin pieni, eikä sillä ole suoraa vaikutusta massabalanssiin. Välillisesti

se vaikuttaa, sillä lämpö sulattaa jäätikön alle ohuen vesipatjan, ns. Weertmanin kalvon (Weertman 1966: 194), joka pienentää kitkaa ja nopeuttaa jäätikön liikettä.

Laakson rinteiltä jäätikölle valuvan veden osuus kokonaissulavesistä on Storglaciärenillä melko suuri. Strömbergin (1988: 57) mukaan keuhalla 1986 viidennes Storglaciärenistä purkautuneesta vedestä oli peräisin laakson rinteiltä. Jäätikön sivureunan muodosta riippuu, virtaako rinteiltä valuva vesi jäätikön päälle vai alle. Jäätikön alla runsaana virtaava vesi pyrkii paineen vaikutuksesta hakeutumaan uomiin. Uomat voivat kovertua jäähän tai alustaan. Jäähän koveruneita uomia kutsutaan R-tunneleiksi (Röthlisberger 1972), kallioperään kaivautuneita taas N-tunneleiksi (Nye 1969, 1976). Storglaciärenin etumaastosta ei löytynyt merkkejä N-tunneleista, ja laaksojäätiköiden alla R-tunnelit lienevätkin yleisempiä jään nopean liikkeen vuoksi (Weertman 1972: 292).

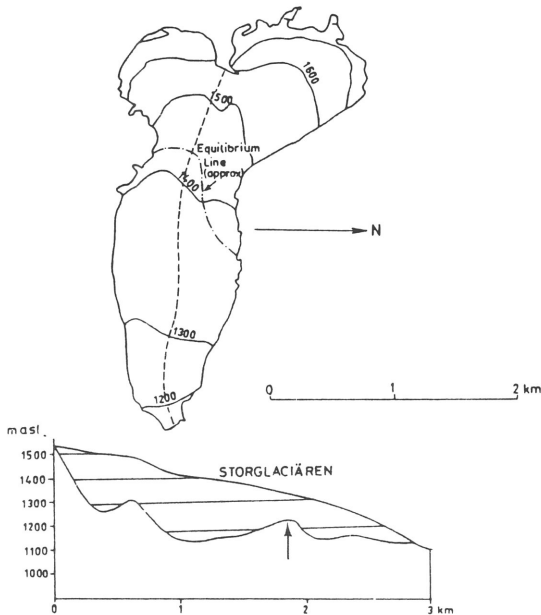
### Jäätikkökaivojen lyhyt elämä

Jäätikön päällä virtaavien sulavesien tärkein reitti jäätikön sisälle ovat railot ja jäätikkökaivot. Storglaciärenin ablaatioalueella railoja syntyy runsaimmin jäätikönläisen kalliokynnyksen

kohdalla, noin 1 330 m:n korkeudessa (kuva 1). Jäätikön pinta halkeilee jäämassan taipuessa, ja syntyviin poikittaisiin railoihin ryöppyää pinnalla virtaavia sulavesiä. Jos railo on tarpeeksi syvä, vesi tunkeutuu liike- ja lämpöenergiallaan yhä syvemmälle jäätikköön synnyttäen kokonaisen englasiaalisen uomaston.

Ohitettuaan kalliokynnyksen jäämassa taipuu uudelleen, tällä kertaa railo puristuu kiinni. Virtaava vesi voi kuitenkin pitää reitin avoimena; jäätikköön syntyy reikä, jäätikkökaivo, jonka kautta yhteys uomastoihin säilyy. Samaan railoon voi porautua vierekkäin lukuisia kaivoja, jolloin samanikäiset kaivot muodostavat railojen suuntaisia jonoja.

Jäätikön pintaan avautuu säännöllisesti railoja sen väistäessä kalliokohoumaa. Sulavedet syöksyvät näihin ylempänä oleviin railoihin ja vanha jäätikkökaivo jää kuivilleen. Paine puristaa kaivon umpeen, ja se täyttyy lumella ja ve-



Kuva 1. Storglaciärenin pinnanmuodot ja pitkittäisprofiili. Railoja ja jäätikkökaivoja on runsaasti nuolen osoittaman kalliokynnyksen kohdalla. (Lähde: Holmlund 1988 a).



Kuva 2. Umpeen jäänyt jäätikkökaivo, ns. crystal quirke Storglaciärenillä 20. 08. 1988.

dellä. Lopulta se jäätyy, eikä jäätikön pinnalla näy kuin koostumukseltaan erilaisen jään alue, ns. crystal quirke, kaivon paikalla (kuva 2). Jäätikkökaivon elämänkaari on lyhyt; Storglaciärenillä aktiivinen jakso kestää yleensä vuoden, sen jälkeen uudet railot estävät veden pääsyn kaivoon. Alueellisena ilmiönä jäätikkökaivot sen sijaan ovat pysyviä — ne syntyvät aina samoille paikoille.

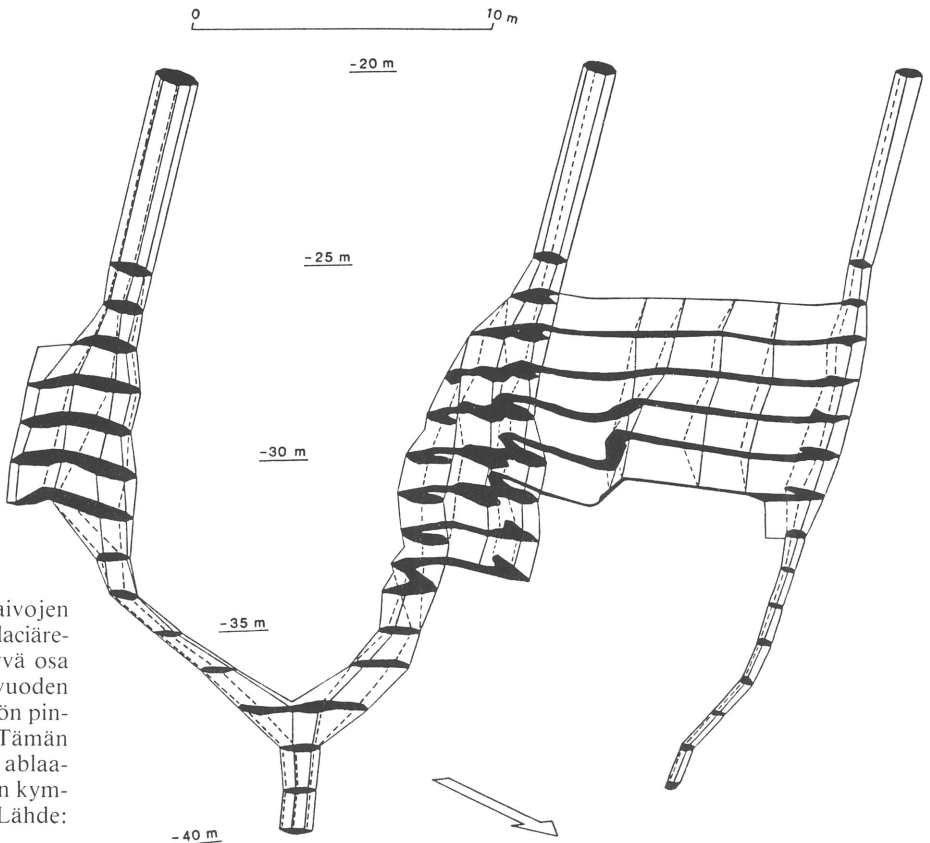
### Jäätikkökaivojen tutkimus

Holmlund (1988b) on rekonstruoinut jäätikkökaivojen sisärakennetta umpeen jäätyneiden kaivojen avulla. Jäätikön pinnalla näkyvä crystal quirke kertoo kaivon poikkileikkauksen jollain tietyllä syvyydellä — ablaatiohan on alentanut jäätikön pintaa kenties jo usealla metrillä. Ablation paljastaessa jäätikön pintaa edelleen, voidaan säännöllisin väliajoin jäätikön pinnalla näkyvä kaivon poikkileikkaus kartoittaa. Kun tunnetaan ablaation nopeus, voidaan poikkileikkauksista integroida kolmiulotteinen kuva paikalla olleesta kaivosta (kuva 3).

Toinen vaihtoehto on tutkia resanttisia kaivoja laskeutumalla niihin tai käyttämällä esimerkiksi köyden päähän kiinnitettyä videokameraa. Tutkimus on parasta suorittaa kevättalvella, jolloin sulavesiä on vähän. Yhdistämällä edellämainitut menetöt Holmlund (1988b) on havainnut kaivojen muodon muuttuvan voimakkaasti 25—30 metrin syvyydessä. Tuohon asti kaivo on poikkileikkaukseltaan lähes ympyrä, mutta alempana muoto muuttuu monimutkaiseksi. Kasvava jään paine pyrkii puristamaan kaivon umpeen, kun taas seiniä pitkin valuva vesi sulattaa jäähän onkaloita ja synnyttää jopa kaivoja toisiinsa yhdistävän tunneliverkoston (kuva 3).

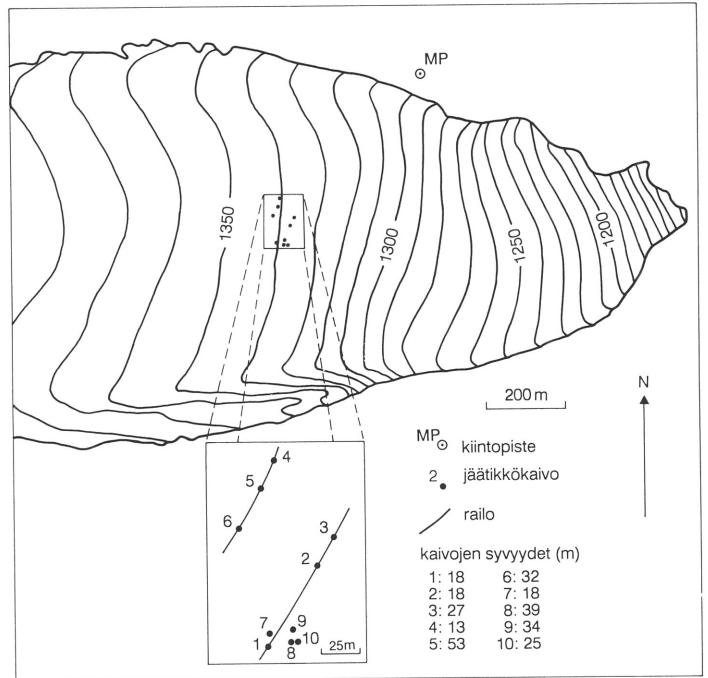
### Kurssin aikana tehdyt tutkimukset

Jäätikkökaivojen syvyyksiä mitattiin kurssilla luotinarulla. Kaikkiaan luodattiin 21 kaivoa, mutta huonon sään takia niistä kyettiin kartalle paikantamaan vain kymmenen. Kartoitus tehtiin jäätikön reunamoreenilla olevalta kiintopisteeltä AGA Geodimeter 12 A:n ja WILD T 2 -teodoliitin avulla.



Kuva 3. Jäätikkökaivojen sisärakennetta Storglaciärenillä. Kuvassa näkyvä osa on 20—40 metriä vuoden 1968 aikaisen jäätikön pinnan alapuolella. Tämän osan paljastuminen ablaation myötä kesti noin kymmenen vuotta. (Lähde: Holmlund 1988 b).

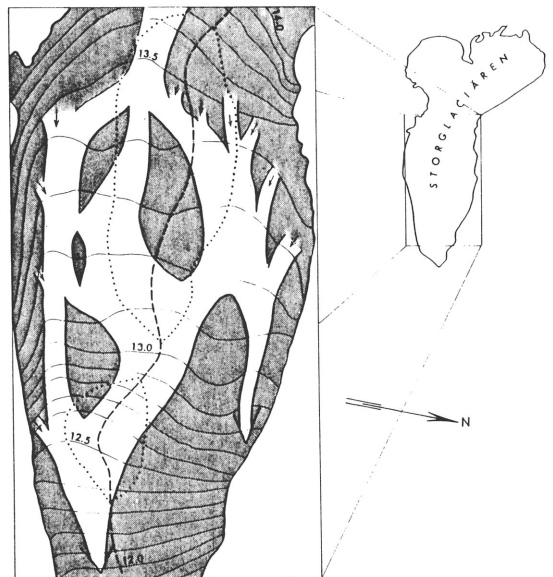
Kuva 4. Kartta jäätikkökaivoista pieneltä alueelta Storglaciärenillä. Karttaan ei ole merkitty alueen kaikkia kaivoja, ainoastaan luodut.



Mitattujen kaivojen syvyydet vaihtelivat 6—53 metrin välillä, keskisyvyyden ollessa noin 25 m. Suuaukon halkaisija vaihteli noin puolesta metristä liki kolmeen metriin asti. Aukon koolla ja kaivon syvyydellä ei näyttänyt olevan yhteyttä, sitävastoin sisään virtaavan veden määrällä ja kaivojen syvyydellä kylläkin. Virtaamhavainnot tehtiin silmämääräisesti, koska mittaamiseen ei ollut mahdollisuutta.

Yleisestä säännöstä, mitä suurempi virtaama, sitä syvempi kaivo, löytyi joitakin poikkeuksia. Eräät syvät kaivot olivat lähes »kuivia», mikä johtuu hiljattain avautuneista uusista railoista kaivon yläpuolella. Kaivot eivät vielä ole reagoineet loppuneeseen vedentuloon, mutta ennen pitkää ne puristuvat umpeen. Esimerkiksi kaivo n:o 10 (kuva 4), joka sijaitsee vain kaksi metriä n:o 8:n alapuolella, ja on siis »kuiva» kaivo, on 14

Kuva 5. Lasketut samanpotentiaalilin käyrät Storglaciärenillä. Yksikkönä on  $10^3 \text{ N/m}^2$ . Veden oletetaan virtaavan kohtisuoraan käyriä vastaan eli ensin vaaleita alueita kohti ja sitten niitä pitkin. Katkoviiva osoittaa, missä joki virtaisi, ellei laaksossa olisi jäätikköä. Pisteviivat rajaavat syvänteet laakson pohjalla. (Lähde: Holmlund 1988 a).



metriä n:o 8:a matalampi. Se puristuu alaosaan umpeen vesien syöksyessä uuteen kaivoon. Kaivot 1, 2 ja 7 osoittautuivat täsmälleen samansyvyisiksi. Ne ovat syntyneet samaan raiioon, joten niiden pohja saattaa osoittaa railon alkuperäisen syvyyden.

Sisäänvirtaamaltaan suurin kaivo (n:o 5) oli myöskin syvin mitatuista: 53 metriä, mikä on yli kolmannes jäätikön paksuudesta tuolla kohdalla (130 m). Ainoa oletettavasti jäätikön pohjalle ulottuva kaivo löytyi kartoitetun alueen ulkopuolelta, jäätikön eteläreunasta. Syvyyttä sillä oli 32 metriä, vaikka se sijaitsi ainoastaan kymmenen metrin päässä jäätikön reunasta. Tämä osoittaa pohjareliefin jyrkkyyden. Kaivoon virtasi runsaasti vettä, ja syvyyksistä kantautui kivien jyskyttävä ääni. Tulevat maantieteilijäsukupolvet voivat — jos kasvihuoneilmiö suo — tarkistaa, syntyikö tuolla kenties paraikaa hiidenkirnu.

### Lopuksi

Jäätikkökaivojen syvyyслуotaukset kurssin aikana tukevat Holmlundin (1988b) tuloksia, joiden mukaan kaivon syvyyteen vaikuttavat siihen virtaavan veden määrä ja alkuperäisen railon syvyys. Holmlund saattoi lisäksi kaivoihin laskeutumalla havaita jäätikön kerrosrakenteen vaikuttavan kaivojen syvyyteen.

Polttavin jäätikkökaivotutkijoiden pohtima kysymys lienee englasiaalisen uomaston rakenne ja sijainti. Shreve (1972) on kehittänyt ajatuksen samanpotentiaalilin pinnoista (equipotential surfaces) virtausten säätelijänä. Potentiaaliin vaikuttavat jäätikön paksuus ja gradientti, joiden avulla voidaan laskea ja piirtää potentiaalikäyrästä. Teorian mukaan vesi virtaa kohtisuoraan näitä samanpotentiaalilin käyriä vastaan (kuva 5). Holmlund (1988a, b) kuitenkin suhtautuu teoriaan tutkimustensa perusteella epäillen. Veden virtaus ei Storglaciärenillä näytä kääntyvän vielä 50—60 metrin syvyydessäkään samanpotentiaalilin käyriä vastaan.

### KIRJALLISUUS

- Drewry, David (1986). *Glacial geologic processes*. 276 p. Edward Arnold. London.
- Hodge, Steven M. (1976). Direct measurements of basal water pressures: a pilot study. *Journal of Glaciology* 16 (74), 205—218.
- Holmlund, Per (1988a). An application of two theoretical melt water drainage models on Storglaciären and Mikkaglaciären, Northern Sweden. *Geografiska Annaler* 70A (1—2), 1—7.
- Holmlund, Per (1988b). Internal geometry and evolution of moulins, Storglaciären, Sweden. *Journal of Glaciology* 34 (117), 242—248.
- Nye, J.F. (1969). Water at the bed of a glacier. *Association internationale d'hydrologie scientifique. Symposium on the Hydrology of the Glaciers, Cambridge 7—13 September 1969, organized by the International Glaciological Society. (IAHS) Publ.* 95, 189—196.
- Nye, J.F. (1976). Water flow in glaciers: jökulhlaups, tunnels and veins. *Journal of Glaciology* 17 (76), 181—208.
- Paterson, W.S.B. (1983). *The Physics of Glaciers*. 380 p. Pergamon Press.
- Röthlisberger, Hans (1972). Water pressure in intra- and subglacial channels. *Journal of Glaciology* 11 (62), 117—203.
- Shreve, R.L. (1972). Movement of water in glaciers. *Journal of Glaciology* 11 (62), 205—214.
- Stenborg, Thorsten (1968). Glacier drainage connected with ice structures. *Geografiska Annaler* 50A (1), 25—53.
- Stenborg, Thorsten (1969). Studies of the internal drainage of glaciers. *Geografiska Annaler* 51A (1), 13—41.
- Strömberg, Katarina (1988). Input of water to Storglaciären from snow on the surrounding valley sides. *Annual Report 1987, Tarfala Research Station*, 55—60. University of Stockholm. Department of Physical Geography.
- Weertman, J. (1966). Effect of a basal water layer on the dimensions of ice sheets. *Journal of Glaciology* 6 (44), 191—208.
- Weertman, J. (1972). General theory of water flow at the base of a glacier or ice sheet. *Reviews of Geophysics and Space Physics* 10 (1), 287—334.