



Jään rakenne, kasvu ja sen mekaanisiin ominaisuuksiin vaikuttavat tekijät **osa 2 - Lujuus**

4.2.2021 - Skrinnari

Kari Kolari

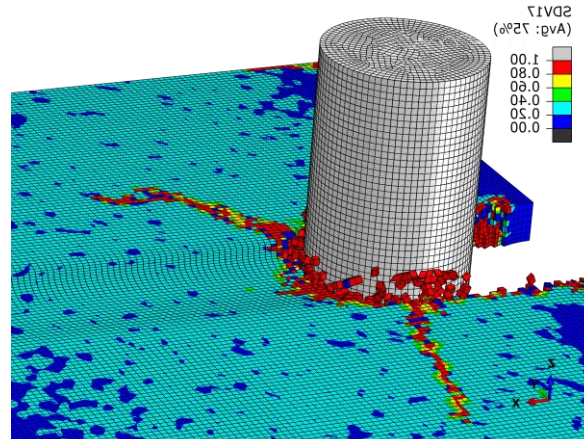


Kuka

- Jäätutkija VTT:ltä: Jääkuormat, jään lujuus
- Väitöskirja jään lujuuden mallintamisesta
- Opetusta/luentoja:
Aalto univ., TUNI, UNIS Huippuvuoret,
Dartmouth College USA, Cambridge; Dalian ur



Fig. Leivnart Friðsson, Luleå



Sisältö

Kertaus:

- Jään rakenne, kasvu, suolaskut

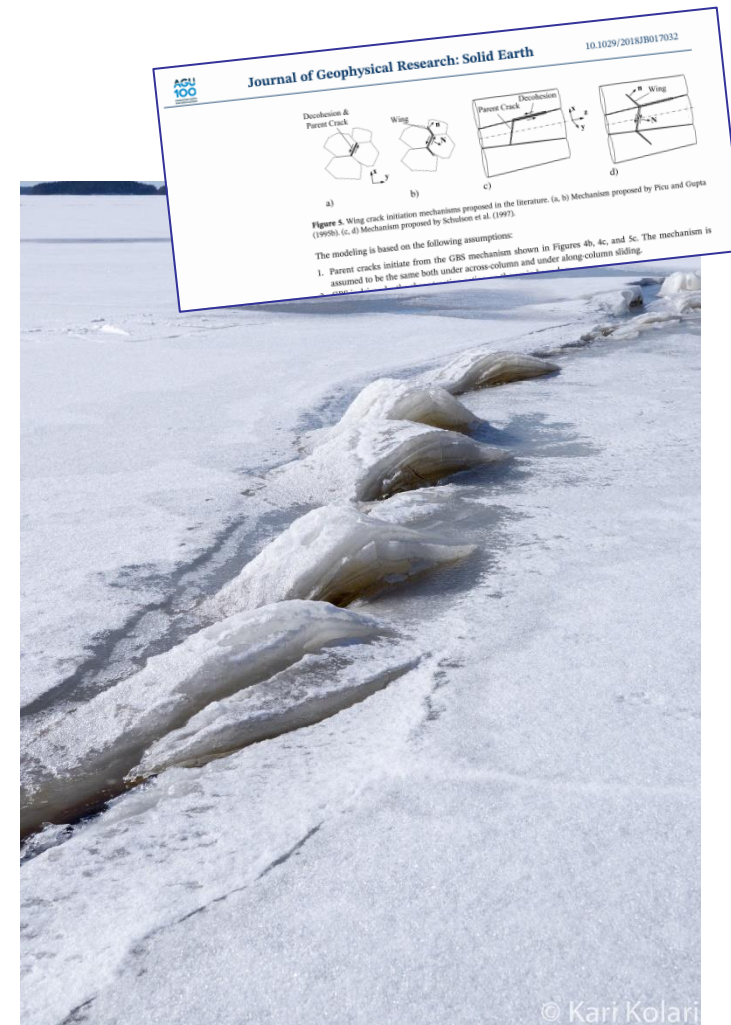
Jään Lujuus

- Jään Muodonmuutosmekanismit
- Kidekoko
- Lämpötila
- Huokoisuus (merkittävä), suola

Murtovesi – Lämpölaajenemiskerroin

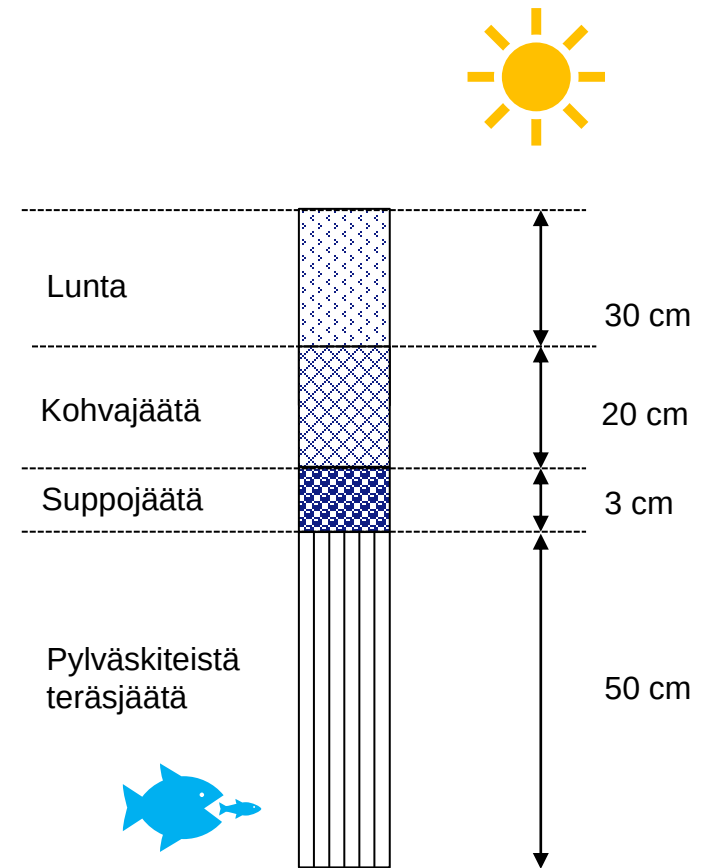
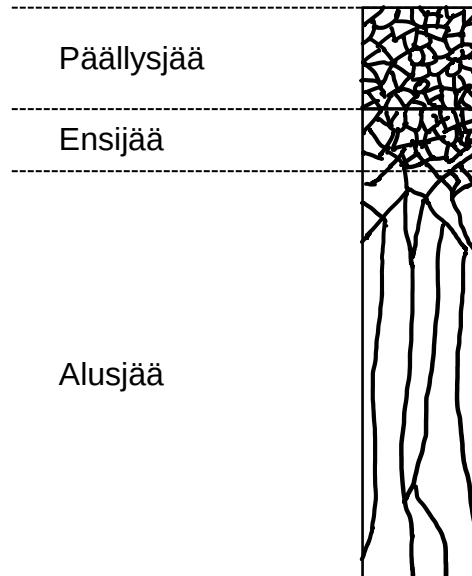
- Mikä se on?
- Miksi se on sama kuin makealla vedellä

Jääkokeita



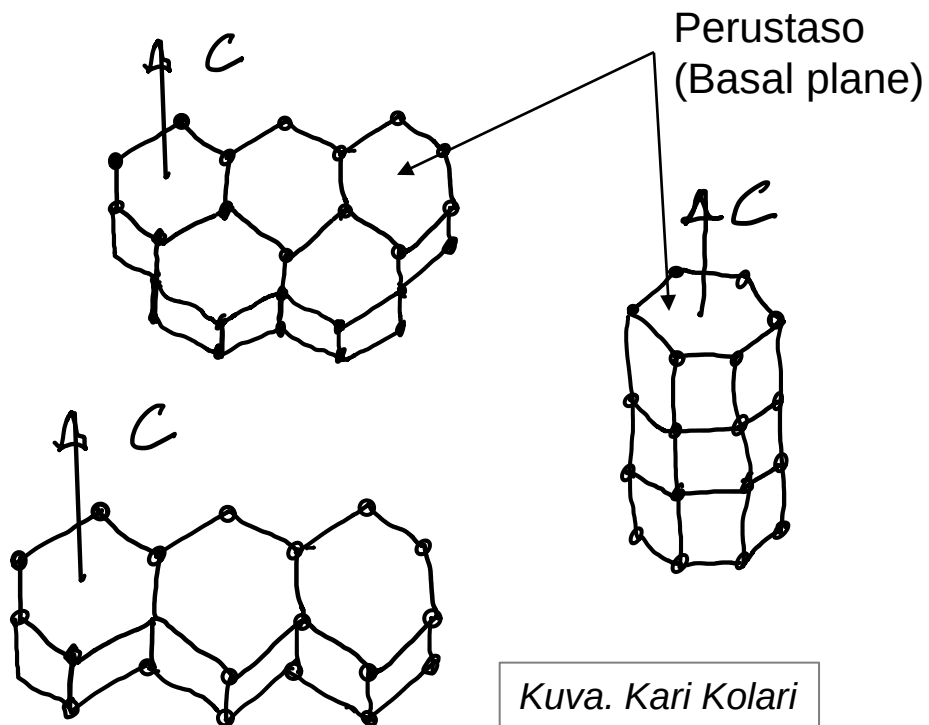
Jään tyypillinen rakenne

- Ensijää (Primary)
- Alusjää (Secondary)
- Päällysjää (Superimposed)

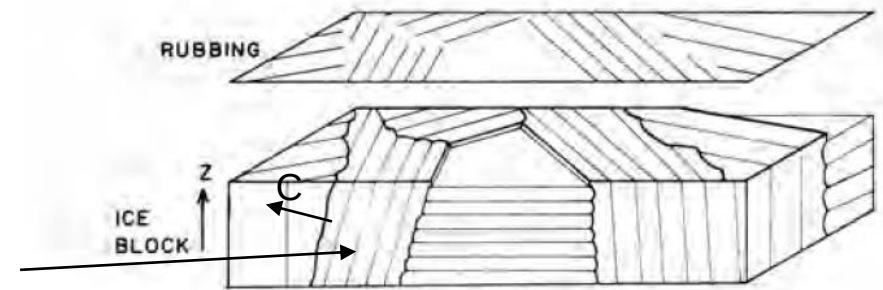


Kiderakenne

- Perustaso ja
- Optinen, C-akseli



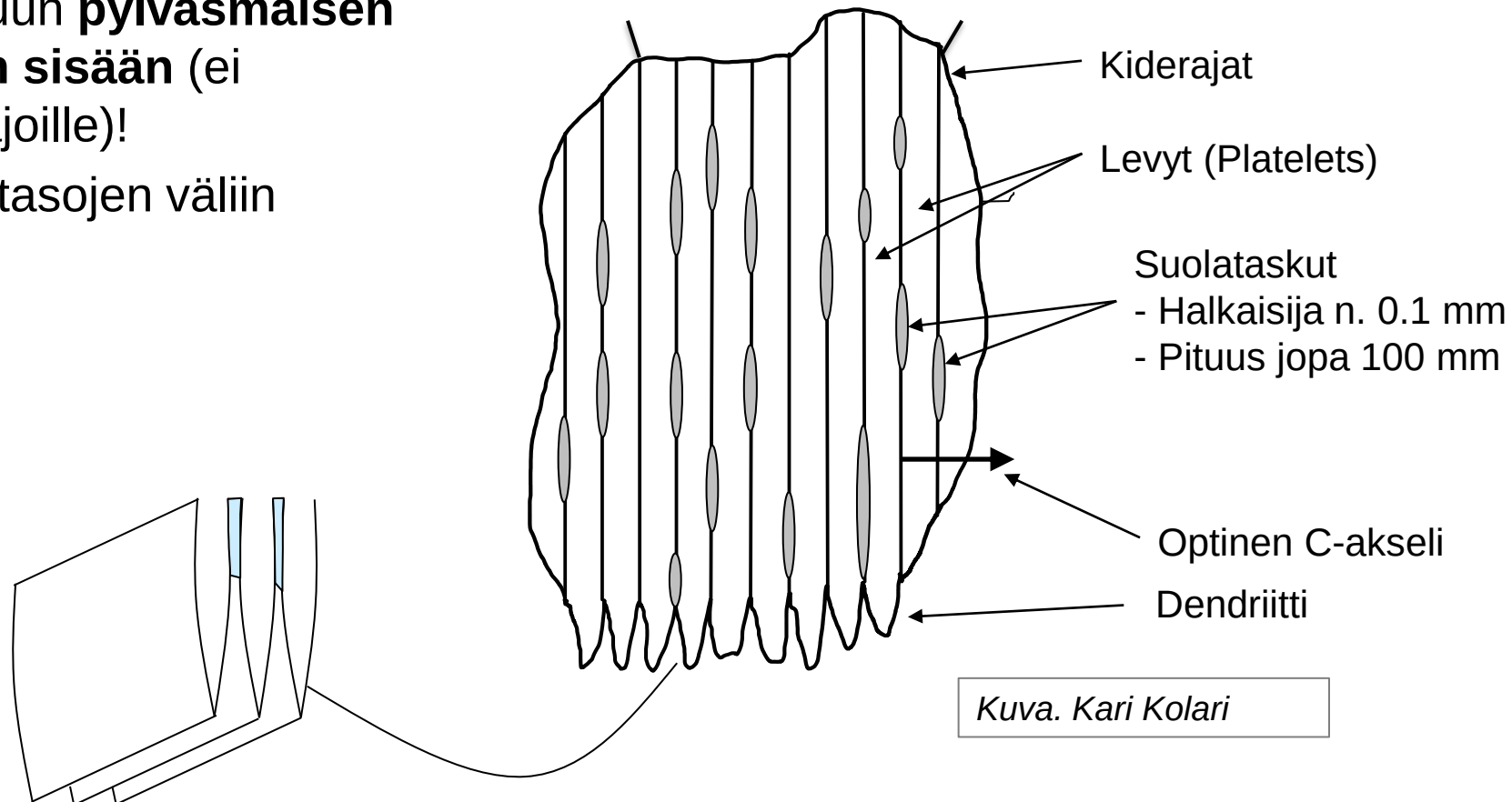
Kuva. Kari Kolari



Kuva, Weeks & Ackley, 1982 p.18

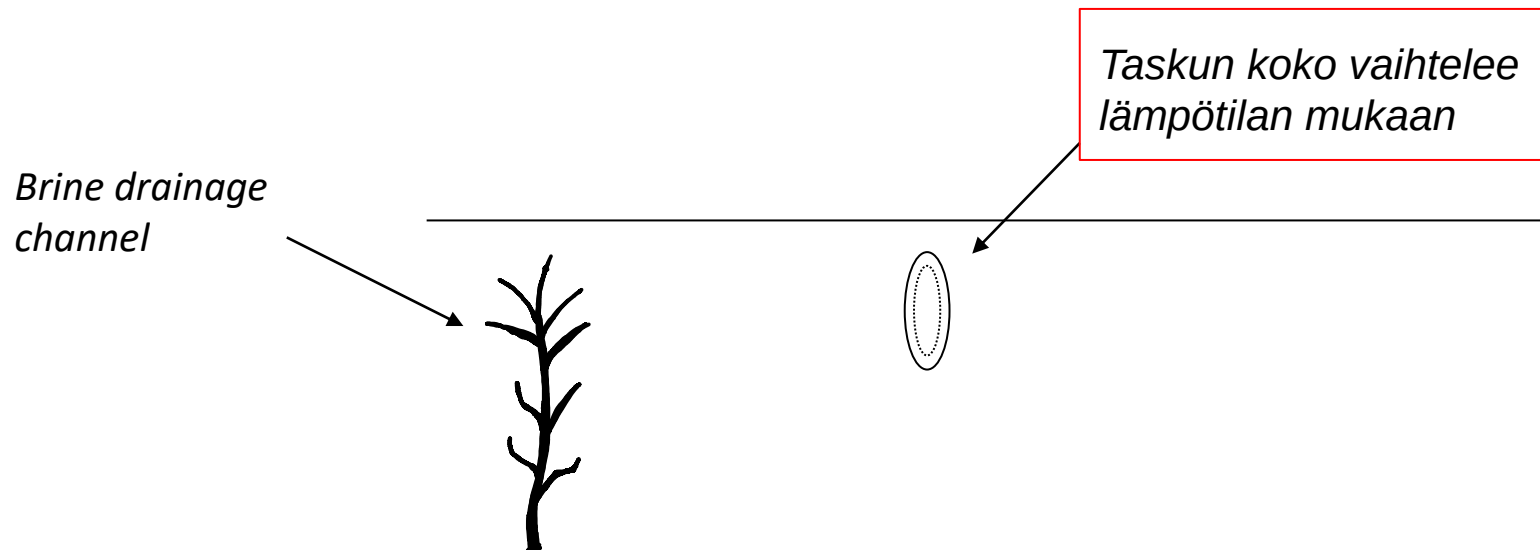
Kasvu ja Suolataskut

- Jään kasvaessa suola jää loukkuun **pylväsmäisen kiteen sisään** (ei kiderajoille)!
- Perustasojen väliin



Suolataskut - suolakanavat

- Painovoiman ansiosta osa suolasta valuu alas mereen suolakanavia pitkin (*Brine drainage channel*)
- Suolataskun koko vaihtelee
 - Osa vedestä jäätyy lämpötilan laskiessa → tasku pienenee
 - Osa vedestä jäätyy lämpötilan noustessa → tasku kasvaa



Jään luokittelu- rakenteen mukaan

Jään luokittelu: lähde: Michel & Ramseier (1971), Nadreau & Michel (1983), Leppäranta (2015)

Tyyppi		Kasvuolosuhteet	Huomioita	Kidekoko	C-akseli
Ensijää, Primary	P1	Tyynei vedenpinta, pieni lämpötilagradientti (hidas kasvu)	Epäsäännölliset kiderajat, erittäin suuret kiteet mahdollisia	L ... XXL	pysty
	P2	Tyynei vedenpinta, suuri lämpötilagradientti tai ulkopuolinen nukleatio (nopea kasvu)	Marmorijää, kiteet senteistä kymmeneen sentteihin	M ... XL	Satunnainen ja pysty
	P3	Häiriöinen, turbulентtinen vedenpinta (esim. Aallokko tai joki). Nukleoitunut suposta		S ... M	satunnainen
	P4	Lumesta/lumisateesta nukleoitunut		S ... M	satunnainen
Alusjää, Secondary	S1	Kasvaa P1 jään alla		L ... XL	Pysty
	S2	Kasvaa P2 jään alla	Tyypillisin tyyppi merissä ja järvissä	S ... XL	Vaaka
	S3	Virtaavassa vedessä		M ... XL	Vaaka, suuntautunut
	S4	Suppokerros, P3:sta		S ... M	Satunnainen
	S5	Drined frazil, P3:sta	Alhainen tiheys	S ... M	Satunnainen
Päällysjää, Superimposed	T1	Lumijää	$830 < \rho < 900 \text{ kg/m}^3$	S ... M	satunnainen
	T2	Huokoinen Lumijää	$\rho \approx 600 \text{ kg/m}^3$	S ... M	satunnainen
	T3	Kasvanut jään päällä olevasta vedestä	Voi kasvaa kuten P tai S	Kaikki koot	Mikä tahansa

P1 Jää

Tyyni vesi – hidas kasvu

- Murtovesi & Makea vesi
- Isoja kiteitä
- C-akseli enimmäkseen pystyssä



Isoja kiteitä merellä, Vanhankaupunginselkä, Hki

P2 Jää

Tyyntä vettä – nopea kasvu

- Murtovesi & Makea vesi
- Isoja kiteitä
- C-akseli ylöspäin ja sivulle



P2 Jää

Tyyni vesi – nopea kasvu

- Murtovesi & Makea vesi
- Isoja kiteitä
- C-akseli ylöspäin ja sivulle
- Järvellä kidekokoa ei usein havaitse paljaalla silmällä



Terästä Hiidenvedellä, Lohja

© Kari Kolari

P3 Jää

Häiriöinen vesi

- Tuulella: Meri & Järvi
- Virtaava Joki
- Pieniä kiteitä
- C- aks. Satunnainen
- Lautasjäädä sileään pintaan
- Harmaa/maitomainen

Hyydejää, suppo
Sväll is
Frazil ice

Sisältö

Kertaus:

- Jään rakenne, kasvu, suolaskut

Jään Lujuus

- Jään Muodonmuutosmekanismit

- Kidekoko

- Lämpötila

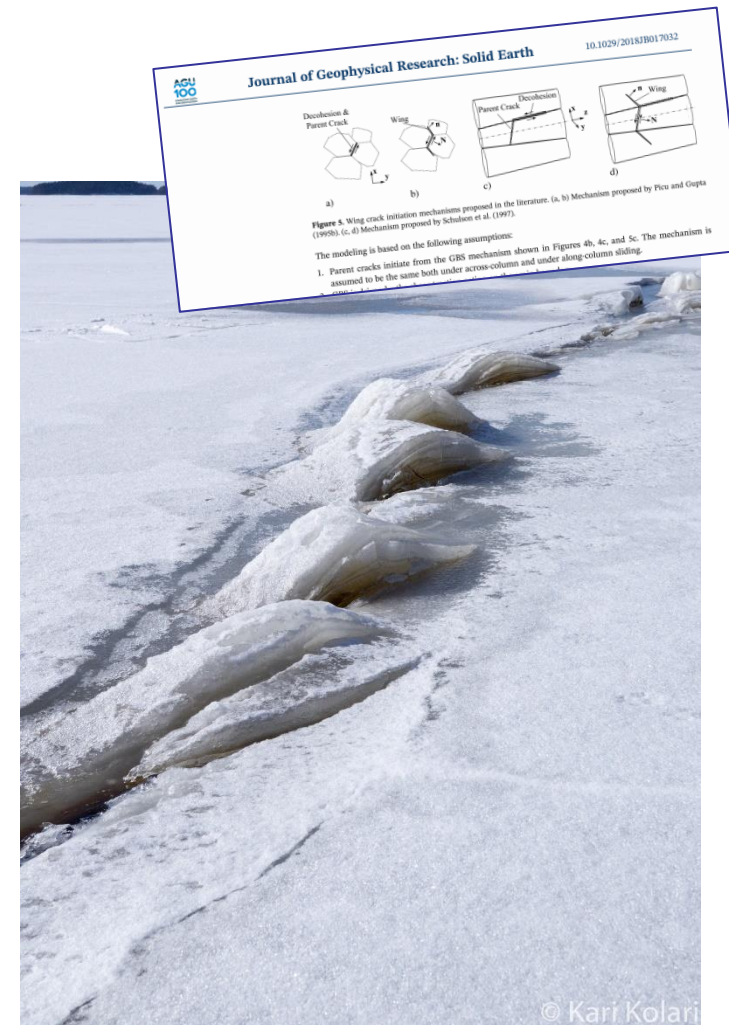
- Huokoisuus (merkittävä), suola

Murtovesi – Lämpölaajenemiskerroin

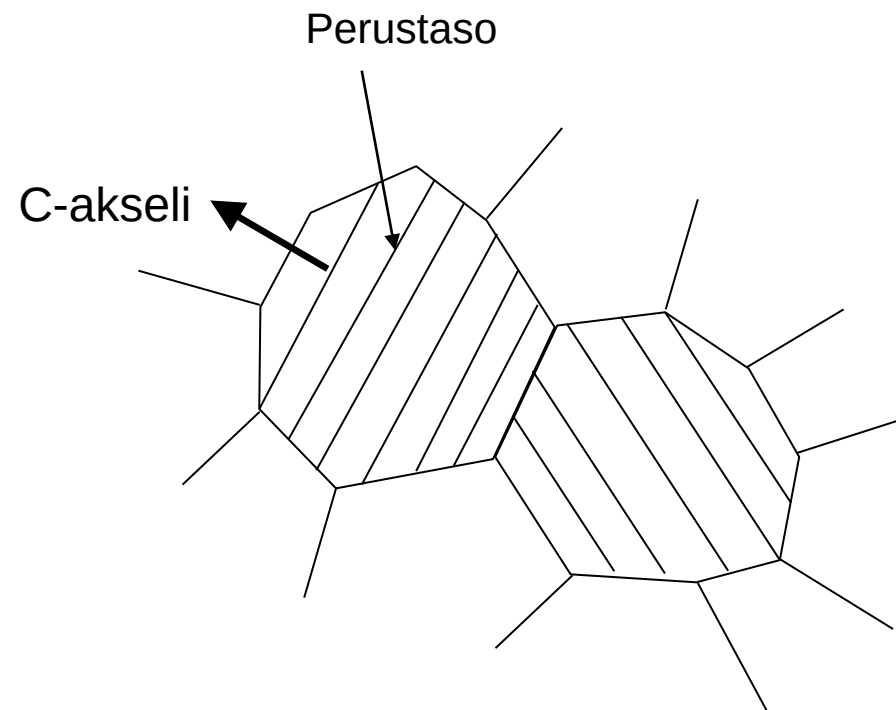
- Mikä se on?

- Miksi se on sama kuin makealla vedellä

Jääkokeita

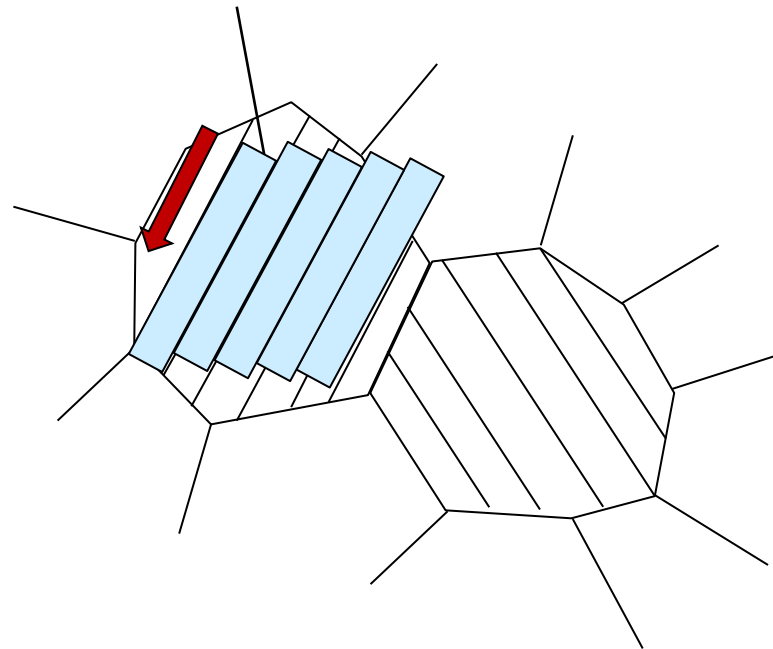


Dislocation Pileup (DP)



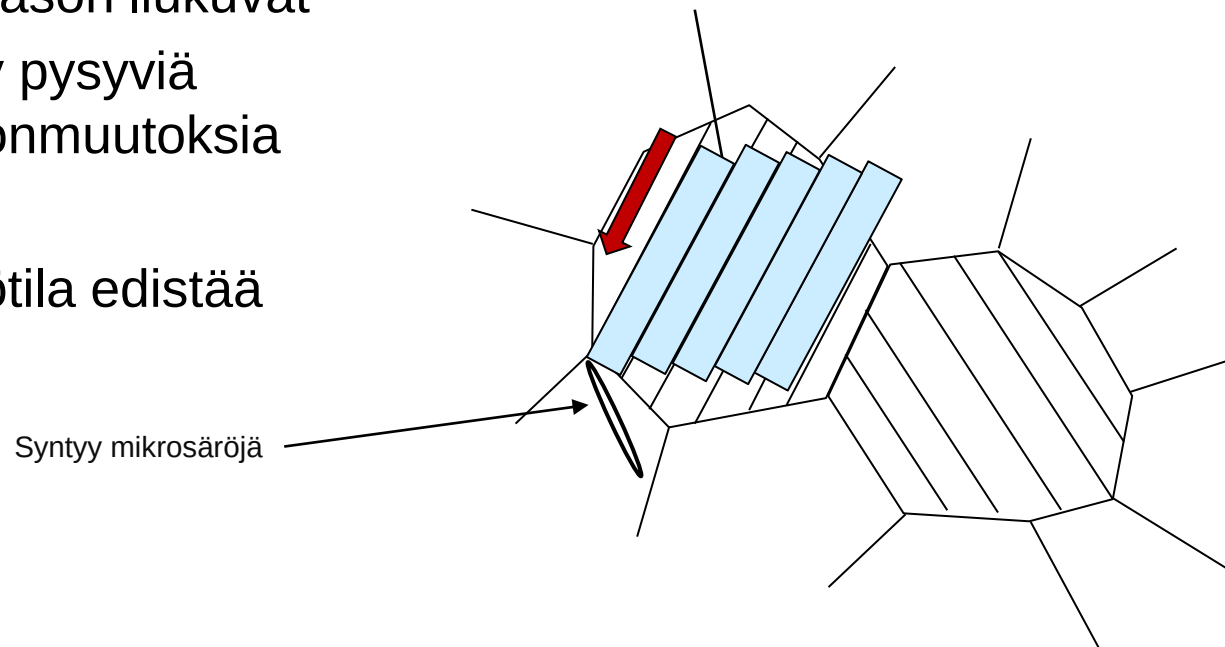
Dislocation Pileup

- Viruminen, plastinen muodonmuutos
- Perustason liukuvat
- Syntyy pysyviä muodonmuutoksia



Dislocation Pileup (DP)

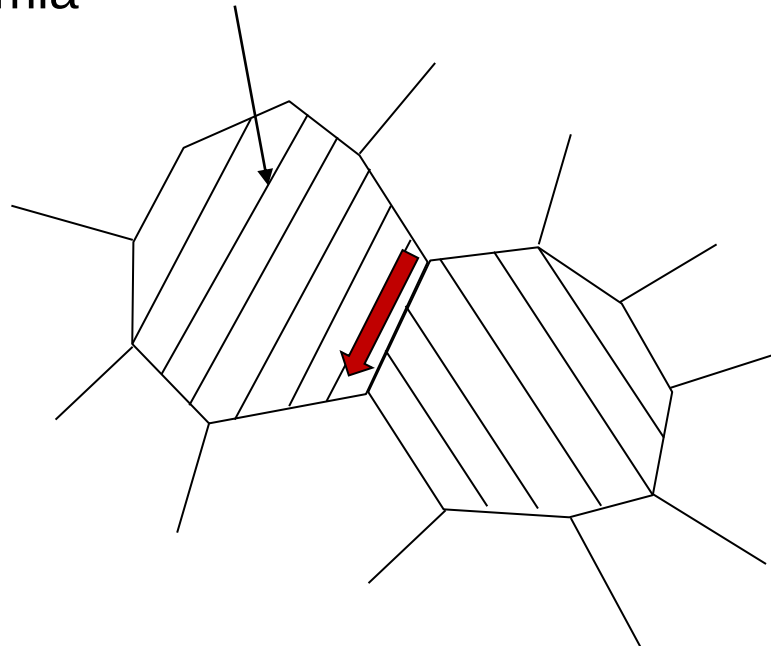
- Viruminen, plastinen muodonmuutos
- Perustason liukuvat
- Syntyy pysyviä muodonmuutoksia
- Hidas
- Lämpötila edistää



Grain boundary sliding (GBS)

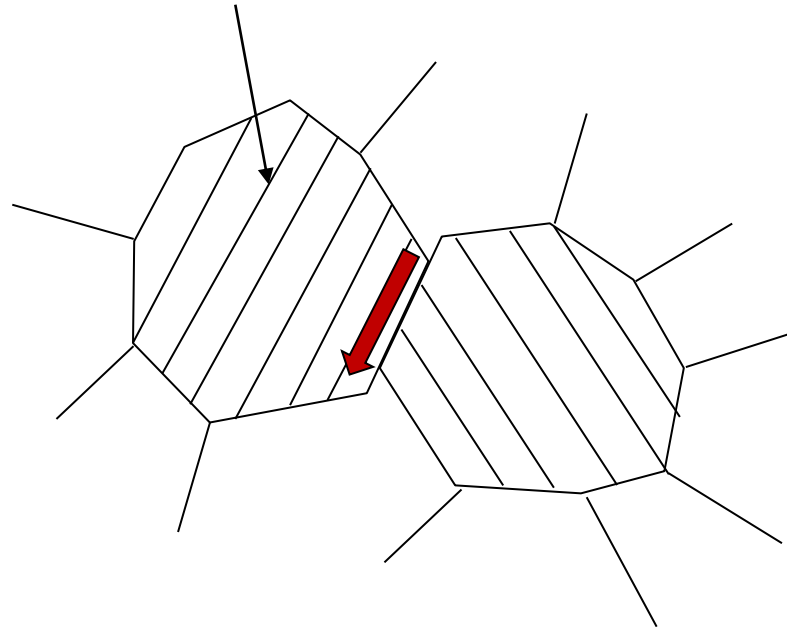
Grain boundary sliding (GBS)

- Aktivoituu nopeissa kuormituksissa
- Kiderajoilla tapahtuu liukumia



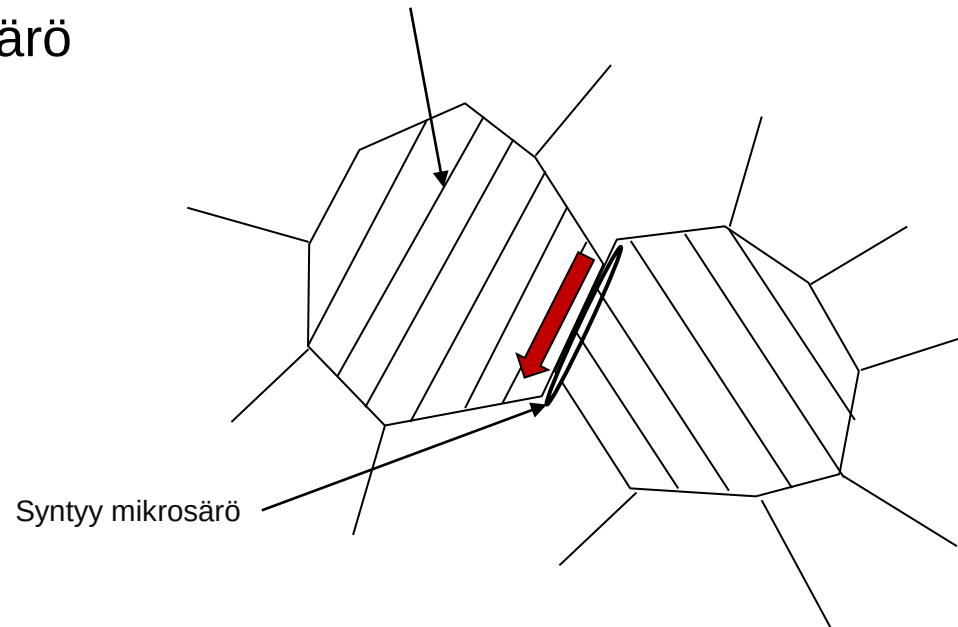
Grain boundary sliding (GBS)

- Aktivoituu nopeissa kuormituksissa
- Kiderajoilla tapahtuu liukumia



Grain boundary sliding (GBS)

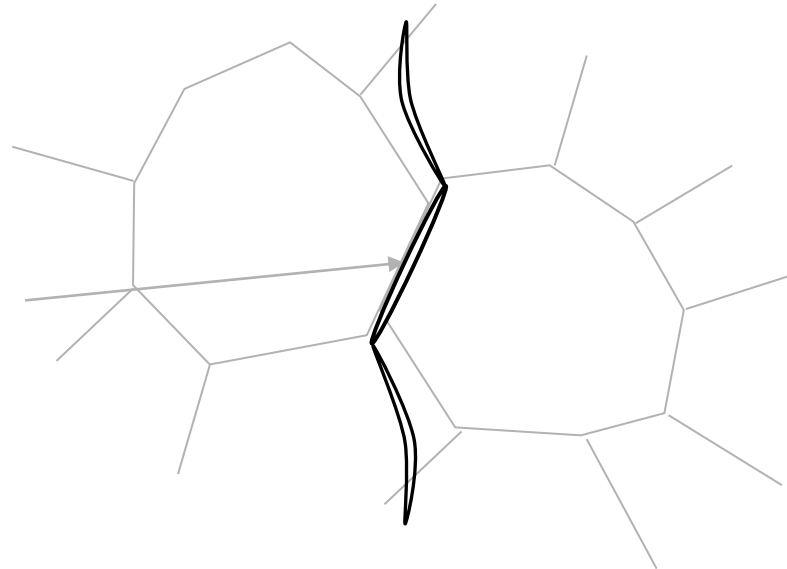
- Aktivoituu nopeissa kuormituksissa
- Kiderajoilla tapahtuu liukumia
- Kiderajalle tulee särö



Grain boundary sliding (GBS)

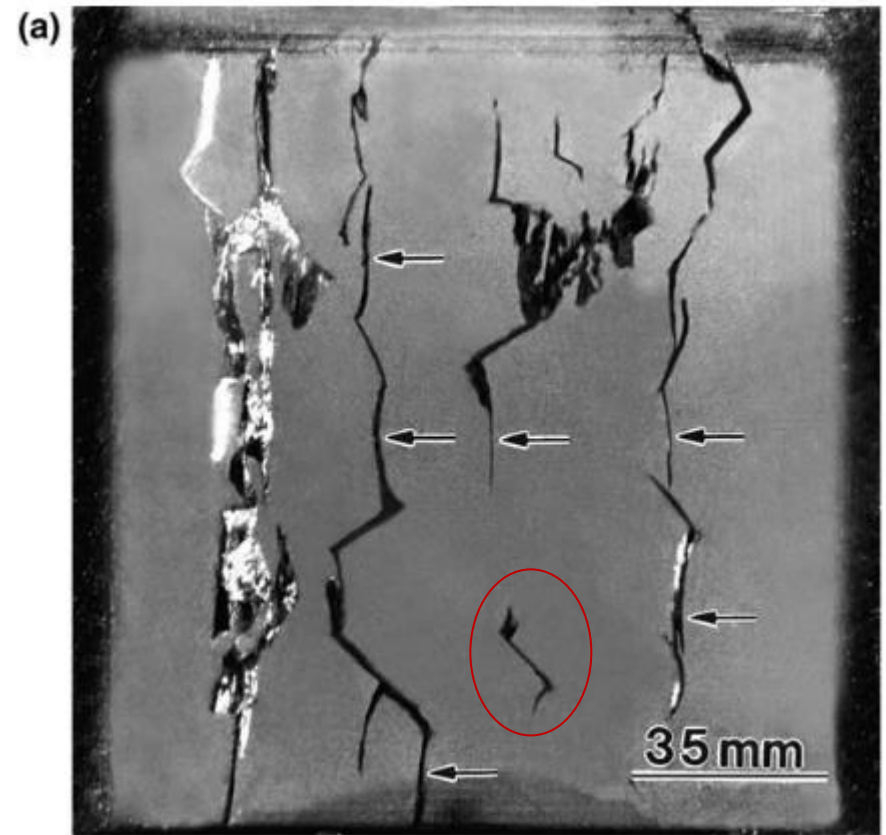
- Säröstä kasvaa siipisärö (wing crack)
- Kitka vaikuttaa Särön kasvuun
- Kovalla pakkasella kova kitka
 - Kasvu "hidastuu"

Kitka vaikuttaa
liukumiseen



Grain boundary sliding (GBS)

- Siipisäröjä puristuskokeessa
- Makean veden jää



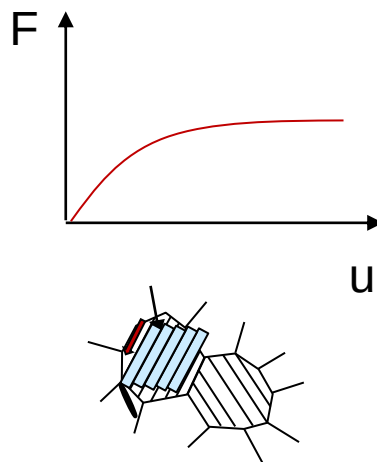
Kuva: Iliescu & Schulson, (2004)

Jää – Kuormitusnopeus

Kahdenlaista käyttäytymistä

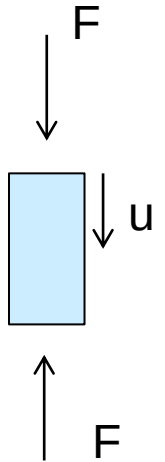
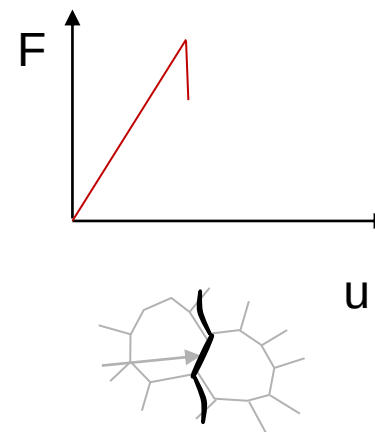
- Sitkeää

- Hitaassa, pitkäkestoisessa kuormituksessa

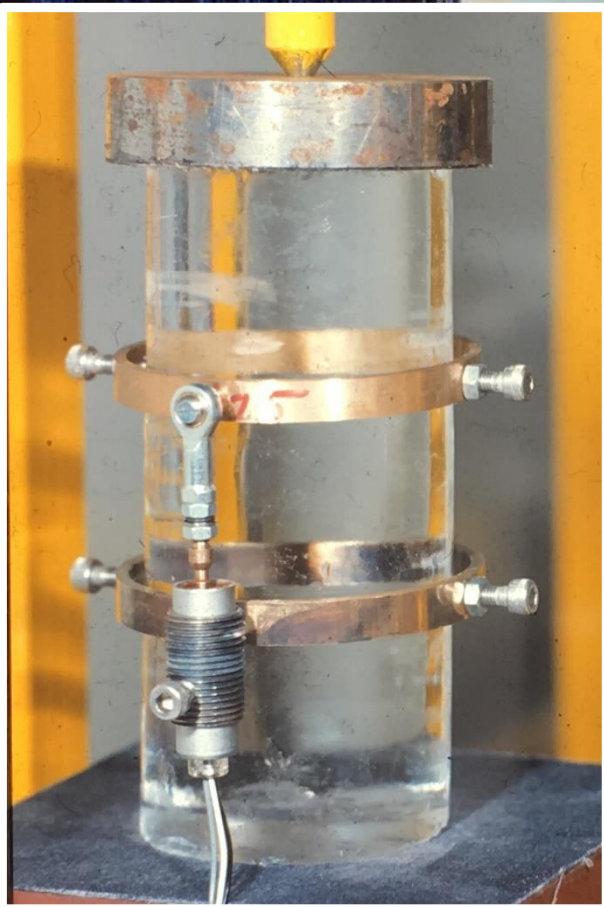


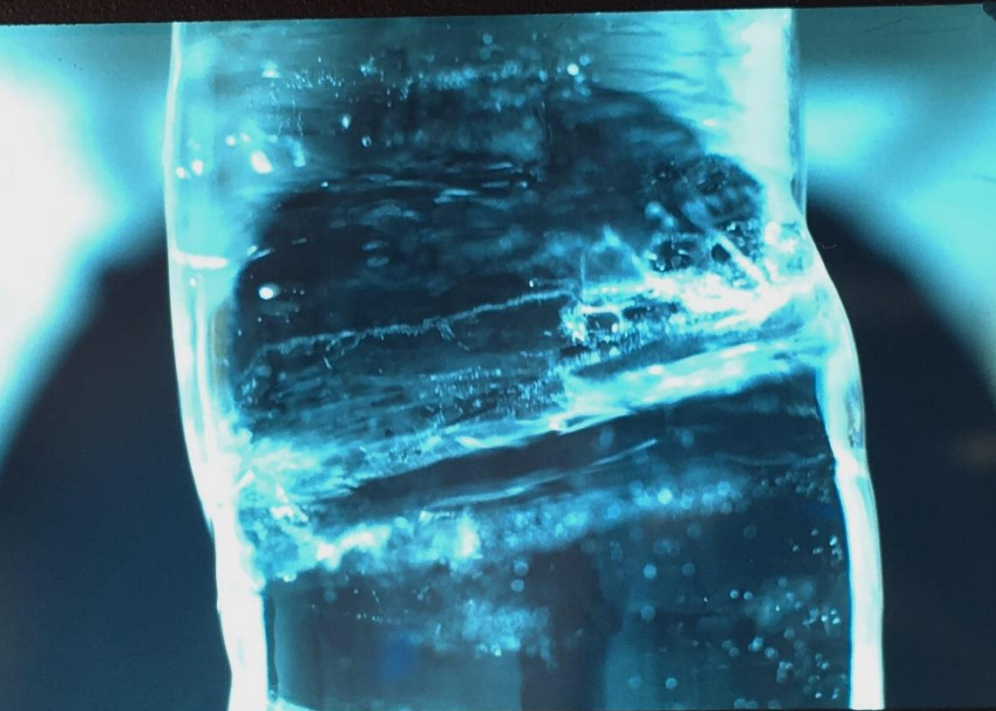
- Haurasta ja lujempaa

- Nopeassa, lyhytkestoisessa kuormituksessa



Hidas kuormitus





Kuva VTT:n arkisto



Kuva VTT:n arkisto

Haurasmurtuma – nopea kuormitus



Hauras ja sitkeä murtuma

- Hitaan kuormituksen mekanismilla
 - On vaikutusta jääilmiöihin kuten aalto/kiharajäähän
 - Ei vaikutusta jään kantavuuteen luistelijan näkökulmasta



Hauras – nopea kuormitus

Kuva. Frode Vassenden, Trondheim Norja



Sitkeä – hidas kuormitus

© Kari Kolari

Jatkossa käsitellään **ainoastaan nopeaan/lyhytaikaiseen** kuormitukseen vaikuttavia tekijöitä.

Sisältö

Kertaus:

- Jään rakenne, kasvu, suolaskut

Jään Lujuus

- Jään Muodonmuutosmekanismit
 - **Kidekoko**
 - Lämpötila
 - Huokoisuus (merkittävä), suola
- Murtovesi – Lämpölaajenemiskerroin

- Mikä se on?
- Miksi se on sama kuin makealla vedellä

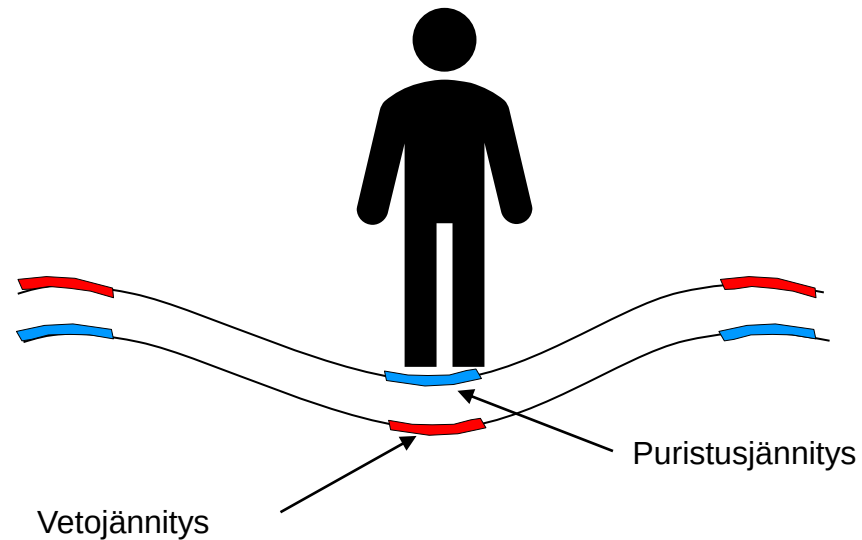
Jääkokeita



Norströmsgrund. Fig by Kari Kolari VTT

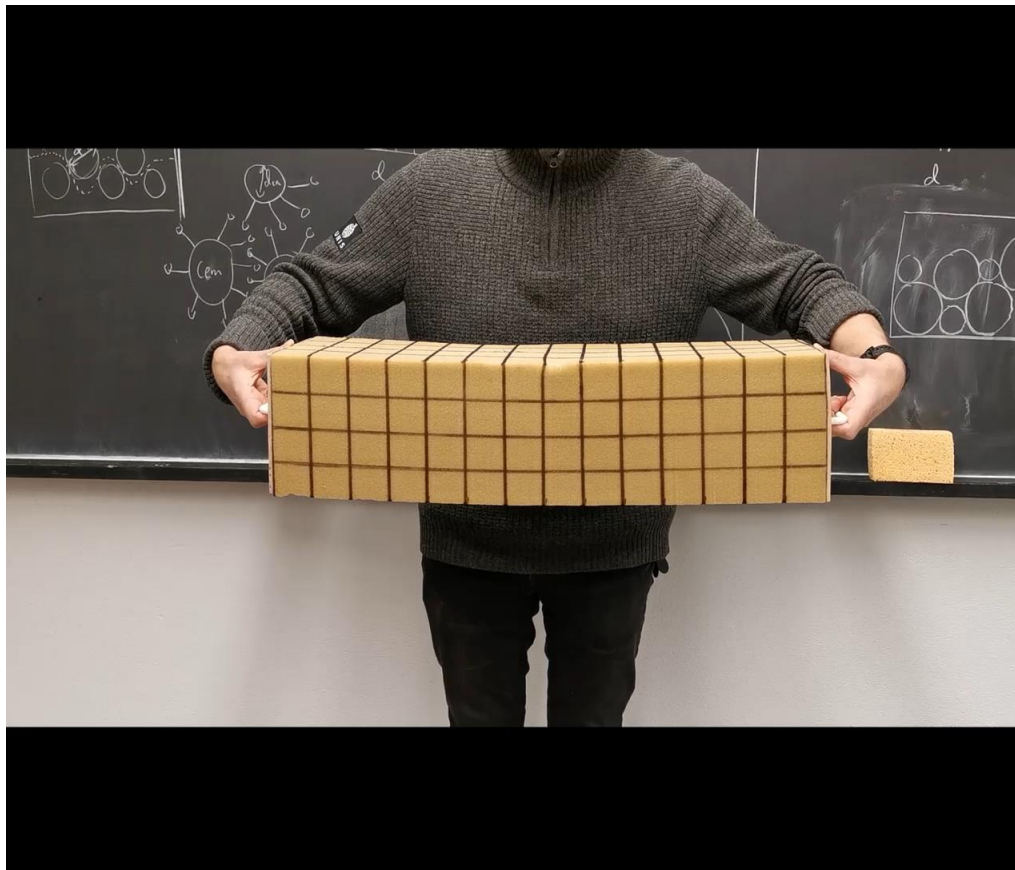
Vetojännitys & puristusjännitys?

- Luistelija synnyttää jäähän puristus- ja vetojännityksiä



Vetojännitys & puristusjännitys?

- Materiaali “kutistuu” → puristusjännitys
- Materiaali venyy → vetojännitys (alapuolelle)



Huomaa!

**Ensin tarkastellaan sellaisen
jään lujuutta, joka ei sisällä huokosia
(ilma- tai suolataskuja)**

Lopuksi tarkastellaan huokoisuuden vaikutusta jäähän

Yksittäisen Jääkiteen lujuus

- Riippuu kuormitus suunnasta on keskimäärin:
 - Veto 4 Mpa
 - Puristus 20 MPa
- Vastaa “mökkibetonin” lujuutta

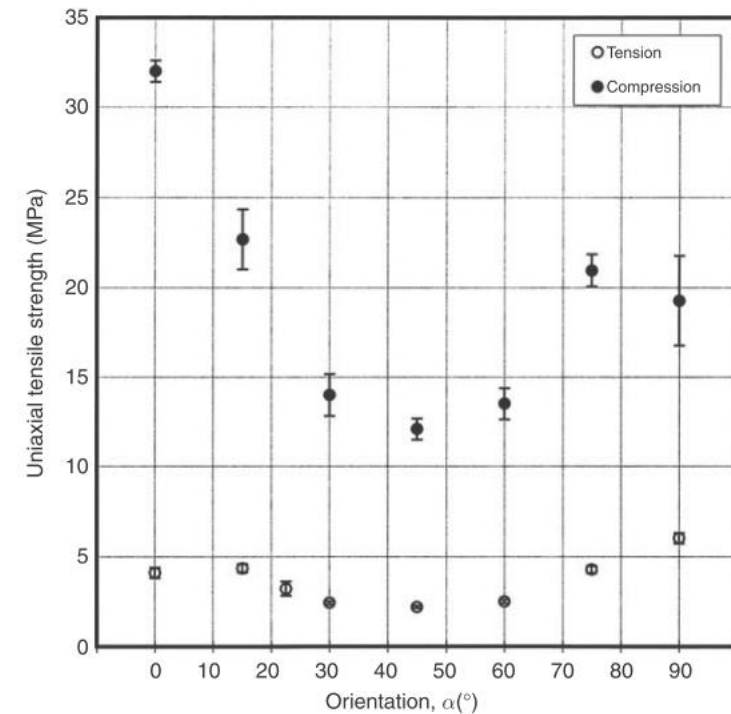


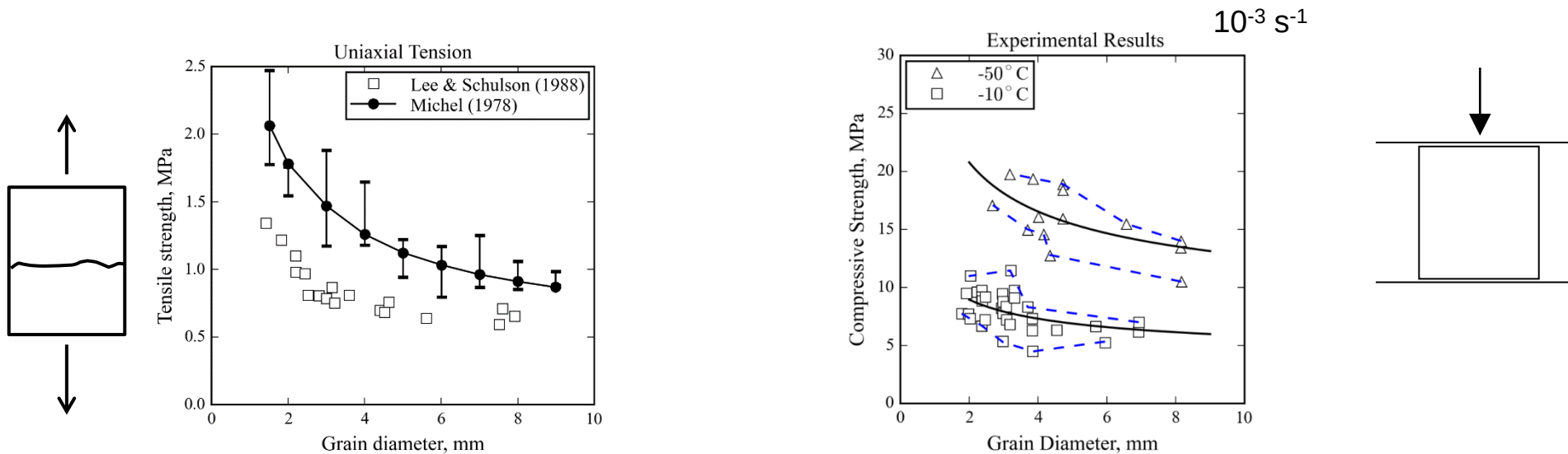
Figure 11.3. Unconfined brittle compressive strength (and tensile strength) of single crystals of ice at $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ vs. orientation of the basal plane. The parameter α denotes the angle between the c -axis and the loading direction. (Data from Carter, 1971.)

From: Schulson & Duval

Monikidejää - Kidekoko

Vetolujuus & puristuslujuus:

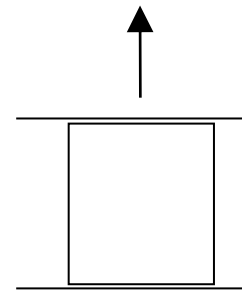
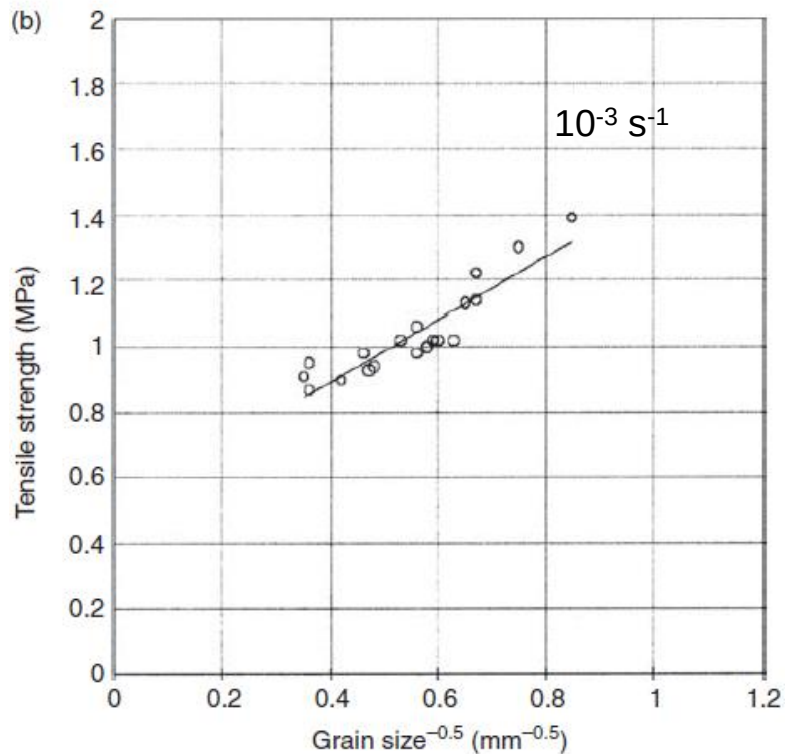
- Pienikiteinen on lujempaa kuin isokiteinen



Figs from: Kolari (2017)

Kidekoko Hall-Petch iippuvuus

Vetolujuus ja puristuslujuus: Hall-Petch $\sigma_t = \sigma_0 + k_t d^{-0.5}$

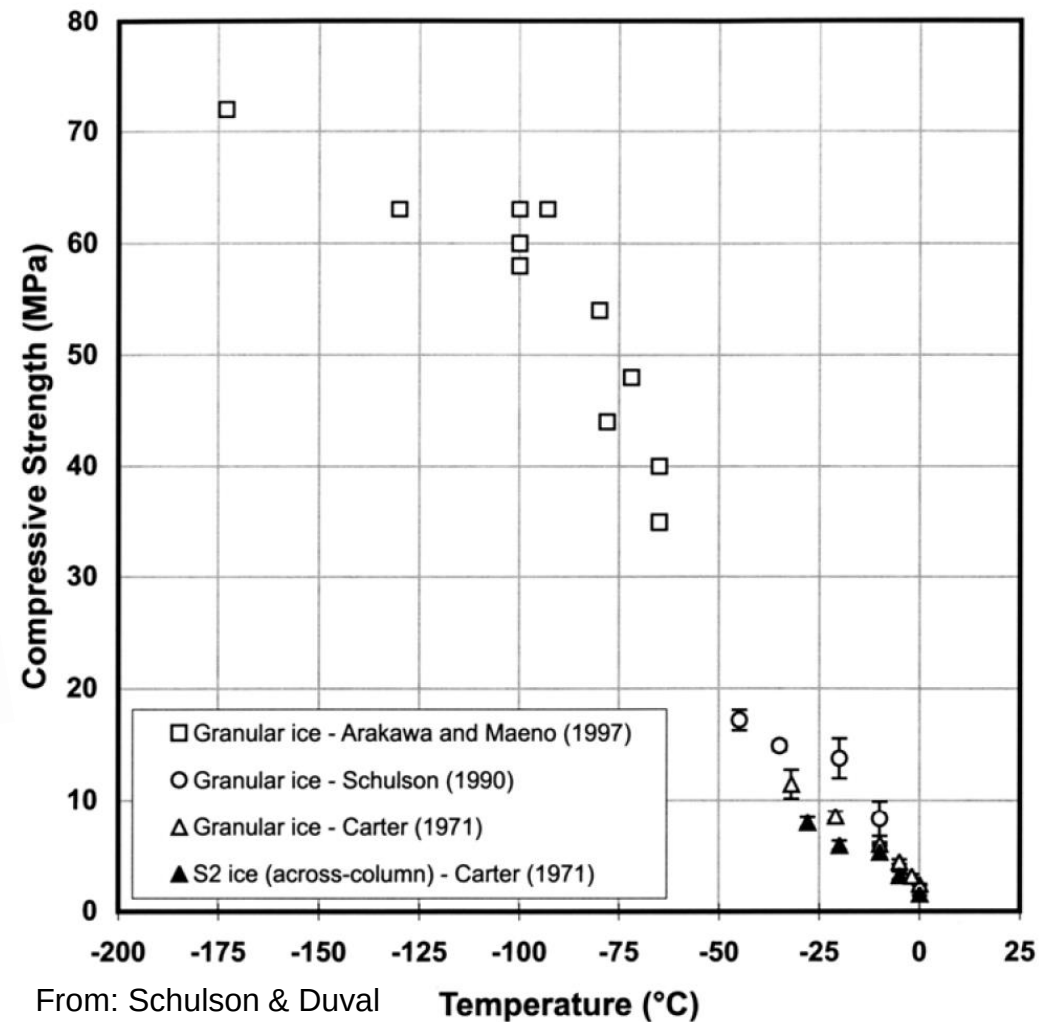
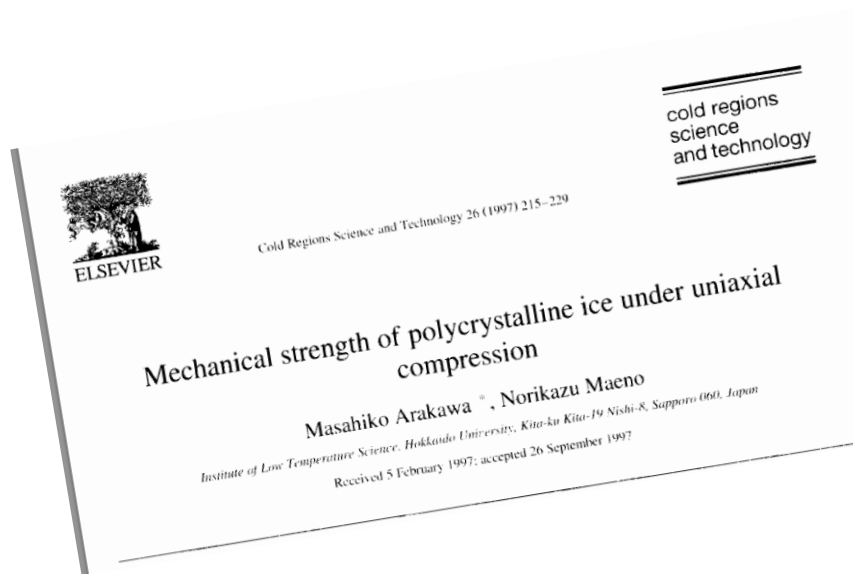


From: Schulson & Duval

Lämpötila ja Lujuus

Jään Puristuslujuus ja lämpötila

- Erittäin kylmässä pienikiteisen jään (n. 1mm) puristuslujuus vastaa erikoislujaa betonia



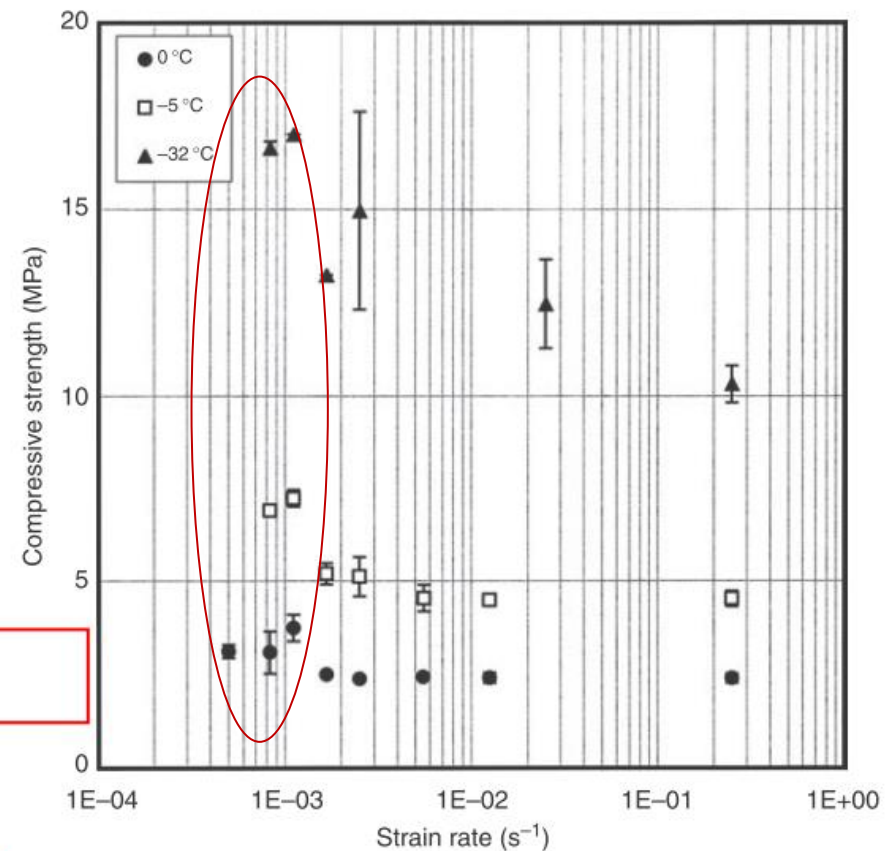
Puristuslujuus ja lämpötila

244

Brittle compressive failure of unconfined ice

Pienikiteisen jään puristuslujuus:

- 0 °C 3 Mpa
- -5 °C 7 Mpa
- -32 °C 15 MPa



Todella pieni
kidekoko

From: Schulson & Duval

Figure 11.4. Unconfined brittle compressive strength of fresh-water granular ice of ~1 mm grain size vs. strain rate. (Data from Carter, 1971.)

Vetolujuus ja Lämpötila

- Ei juurikaan riipu lämpötilasta

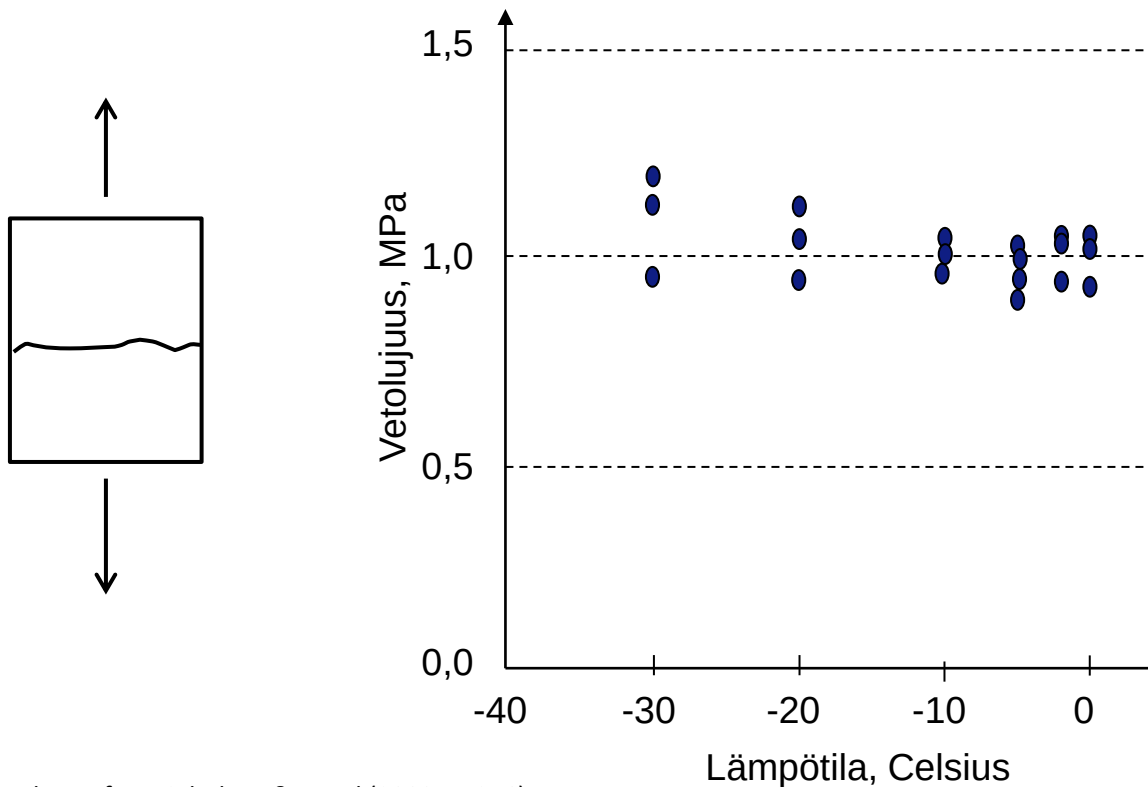
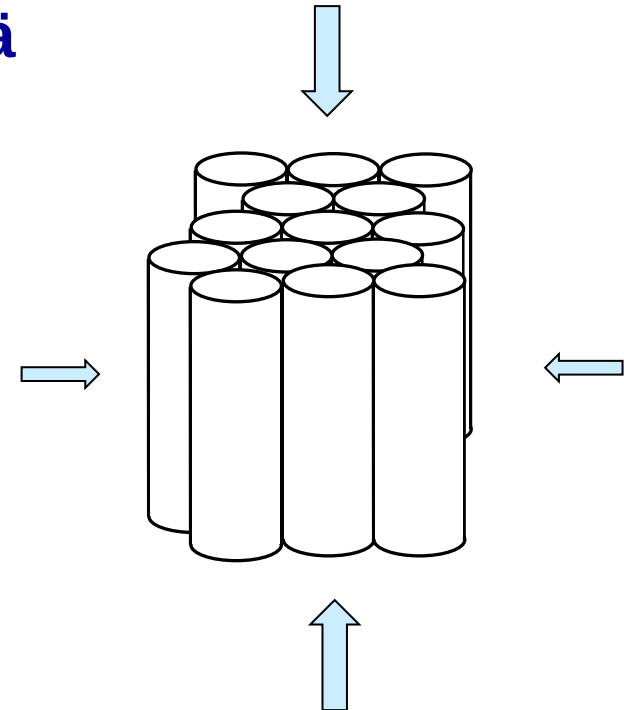


Figure redrawn from Schulson & Duval (2009, p. 216)

Kidesuunta ja lujuus

Pylväskiteinen jää

- Puristuslujuus:
 - Pylvään suunnassa 2-3x poikittain pylvään suuntaan
- Vetolujuus:
 - Pylvään suunnassa n. 1.25x



Kimmokerroin, E – Young's modulus

- Jään “jäykkyyttä” kuvaava suure
- Arvo noin 9,5 GPa (noin 30% betonin jäykkyydestä)
- Kidekoko
 - Voidaan käytännössä pitää kidekoosta riippumattomana
- Lämpötila
 - Lämpötilan laskiessa 0:sta -50:een C kimmokerroin kasvaa 5%



Sisältö

Kertaus:

- Jään rakenne, kasvu, suolaskut

Jään Lujuus

- Jään Muodonmuutosmekanismit
- Kidekoko
- Lämpötila
- **Huokoisuus (merkittävä), suola**

Murtovesi – Lämpölaajenemiskerroin

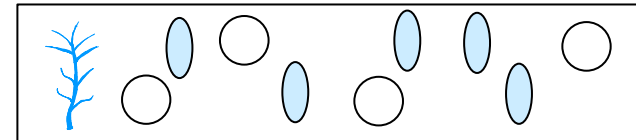
- Mikä se on?
- Miksi se on sama kuin makealla vedellä

Jääkokeita



Huokoisuus!!

- Jäässä on huokosia
 - Ilmaa, Kaasuja
 - Suolataskuja
- Huokokset: Erittäin merkittävä jään lujuutta heikentävä tekijä
 - Merijää
 - Järvijää



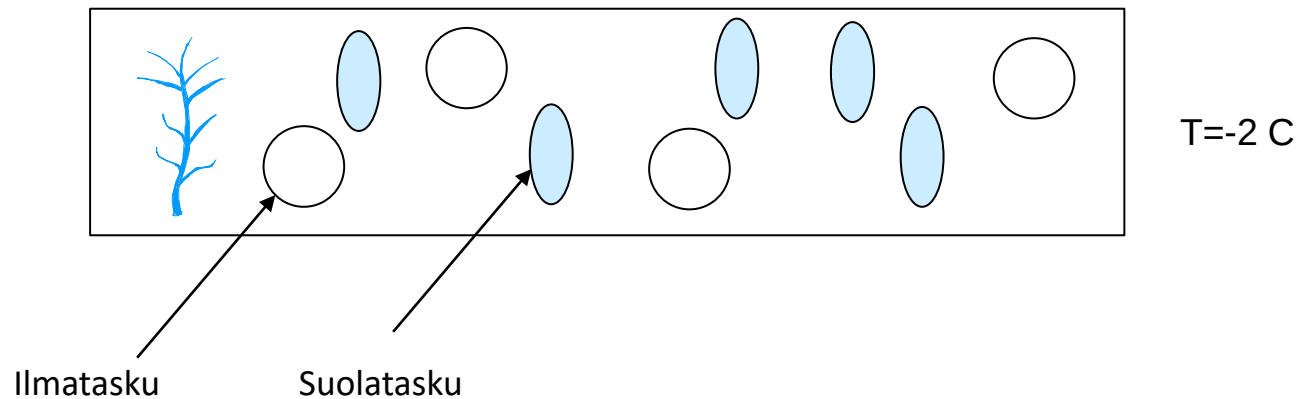
Huokoisuus!!

- Jäässä on huokosia
 - Kaasuja
 - Suolataskuja
- Huokokset: Erittäin merkittävä jään lujuutta heikentävä tekijä
- **“Suola ei heikennä jäätä”**
Mutta Suolatasku eli Huokonen heikentää
 - Jää ei vahvistu vaikka suola poistuisi suolataskuista

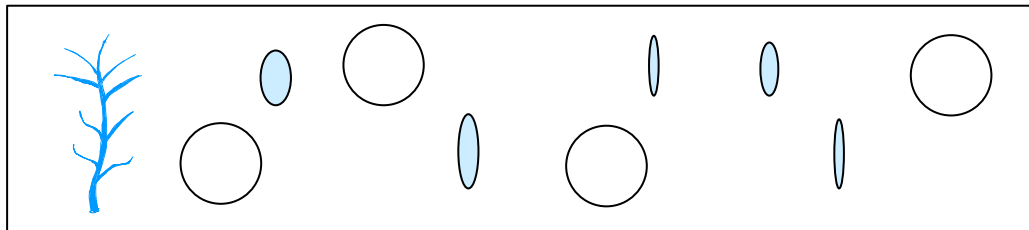


Merijään Erikoisuus!! Huokoisuus ja Lämpötila

- Muista:
Suolataskun koko muuttuu lämpötilan muuttuessa
kun osa vedestä jäätyy tai sulaa



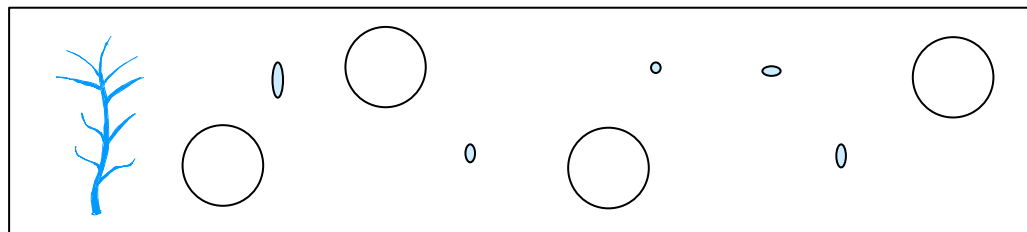
Huokoisuus ja Lämpötila



$T = -7\text{ C}$

Huokoisuus ja Lämpötila

- Kovalla pakkasella suolataskut ovat pieniä



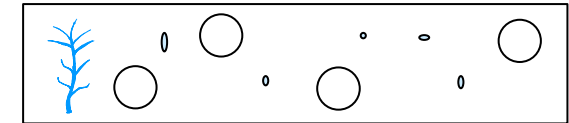
T= -15 C

Merijään lujuuden lämpötilariippuvuus johtuu suurelta osin suolataskujen koon muutoksesta

Huokoisuus Jäämekaniikassa

- Tärkeä käsite: huokoisuus (porosity):

$$v_{tot} = \frac{V_{suola} + V_{ilma}}{V} = v_b + v_a$$



- Jossa V_b suolataskujen tilavuusosuus “brine volume”
- Jossa V_a ilman ja kaasujen tilavuusosuus “air volume”

Kun $v_{tot} = 1$, jää on pelkkää reikää

Ilmataskut ja suolataskut yhdessä heikentävät jäätä

Huokoisuuden laskeminen jään suolaisuudesta

- Jos jään suolapitoisuus tunnetaan suolan aiheuttama huokoisuus voidaan laskea eri lämpötiloissa:

(Frankenstein & Garner, 1967):

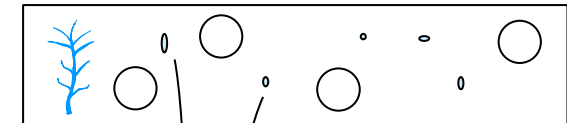
$$v_b = S \left[0,532 - \frac{49,185}{\theta} \right]$$

where: v_b - is the brine volume in ‰

S - the salinity in ‰

θ - the temperature in °C.

(Nadreau & Michel, 1984)



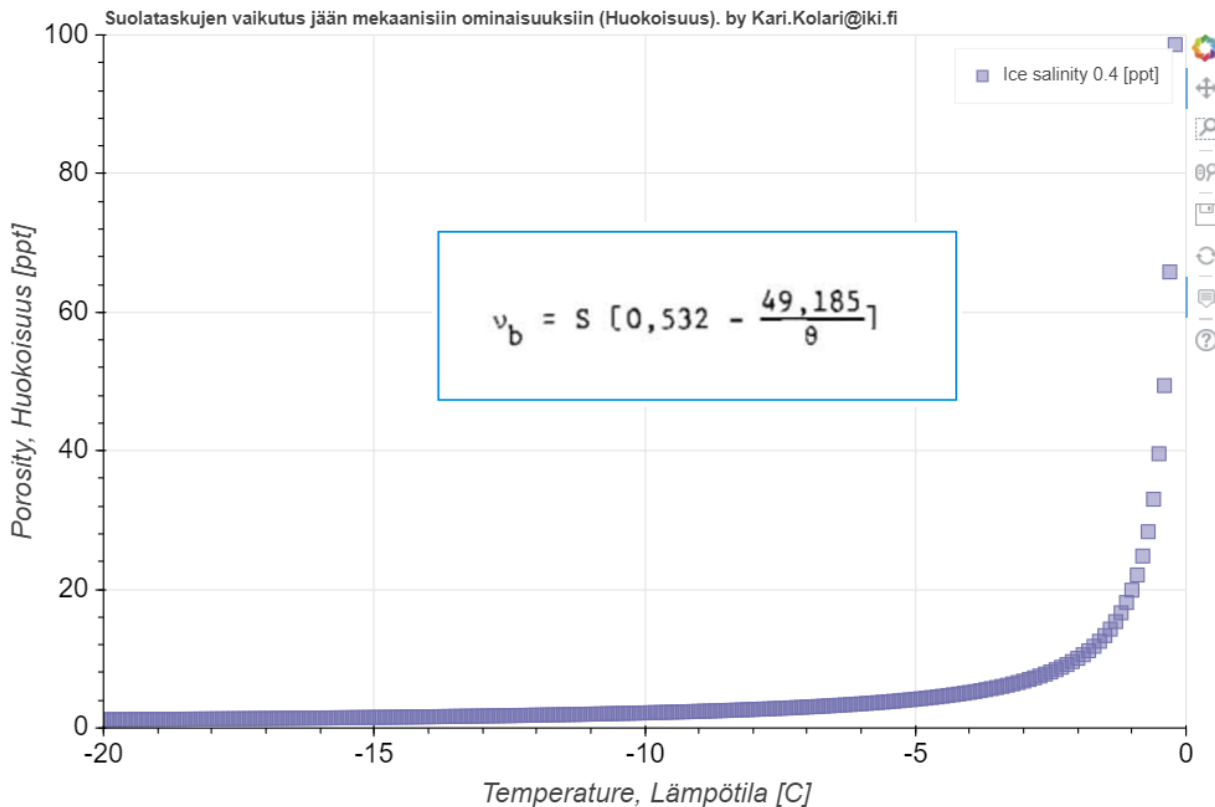
Suola - Arvio merijään huokoisuudesta

- Esimerkki. teräsjää, meri sisälahti*
 - Meriveden suolaisuus: 2 ppt
 - Teräsjään suolaisuus 20%: $0.2 \cdot 2 \text{ ppt} = 0.4 \text{ ppt}$
 - Jään lämpötila: -4C
 - $v_b = 0.4 \cdot (0.532 - 49.185 / (-4.0))$
- T = -4 C: Jään huokoisuus $v_b = 5 \text{ ppt (promillea)}$**

*Vanhankaupunginlahti, Hki: tyypillinen meriveden suolaisuus joulukun pulivälissä on 1.1 ppt)

Miten huokoisuus vaihtelee

- Lähellä sulamispistettä suolataskujen tilavuus kasvaa huimasti!



Huokoisuuksia:

-20 C: 1 ppt

-4 C : 5 ppt

-1 C : 20 ppt

-0.5C: 40 ppt

Huokoisuuden vaikutus mekaanisiin ominaisuuksiin

Periaate Huokoisen jään lujuuden arvioinnissa

- Jos tunnetaan huokoisettoman jään taivutusvetolujuus σ_0 , tai kimmokerroin E_0 , huokoisuuden vaikutusta voidaan arvioida seuraavasti (Weeks & Assur, 1967; Tabata 1959):

$$\frac{\sigma_f}{\sigma_0} = 1 - \sqrt{\frac{\nu_b}{\nu_0}} \quad \nu_0 = 0.25$$

$$\frac{E}{E_0} = 1 - \frac{\nu}{\nu_0} \quad \nu_0 = 0.18 - 0.22$$

Kimmokerroin E

- Kuvaava materialiin “jäykkyyttä”
- Puhtaalle jäälle käytetään usein arvoa noin 9.5 GPa
- Kuvan mukaan
 - 20 ppt $\rightarrow E = 9.3$
 - 5 ppt $\rightarrow E = 9.8$

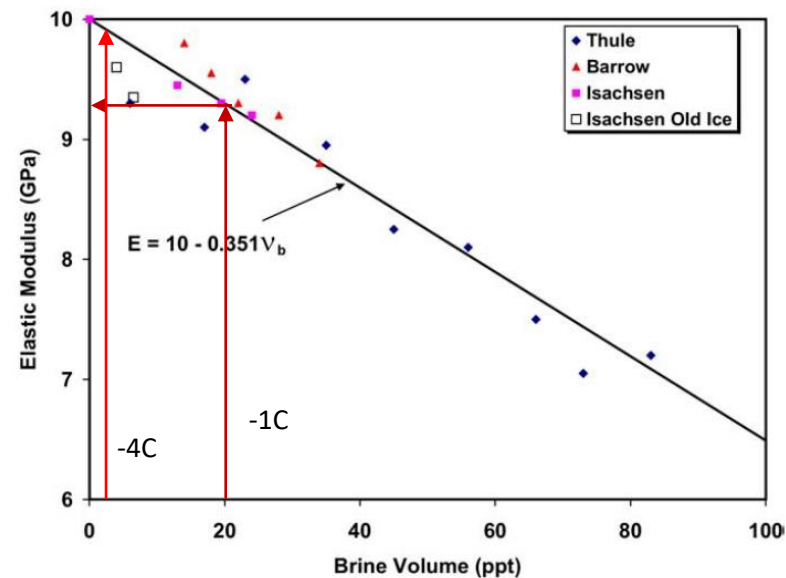


Fig. 20. Elastic Modulus as a function of brine volume for first-year sea ice (after Langleben and Pounder, 1963).

(Timco & Weeks, 2010)

Kimmokerroin E

- Toinen kirjallisuudessa esitetty yhteys (Tabata 1958, From Cammaert Muggeridge)
- Kuvan mukaan
 - 20 ppt $\rightarrow E = 8.6$
 - 5 ppt $\rightarrow E = 9.1$

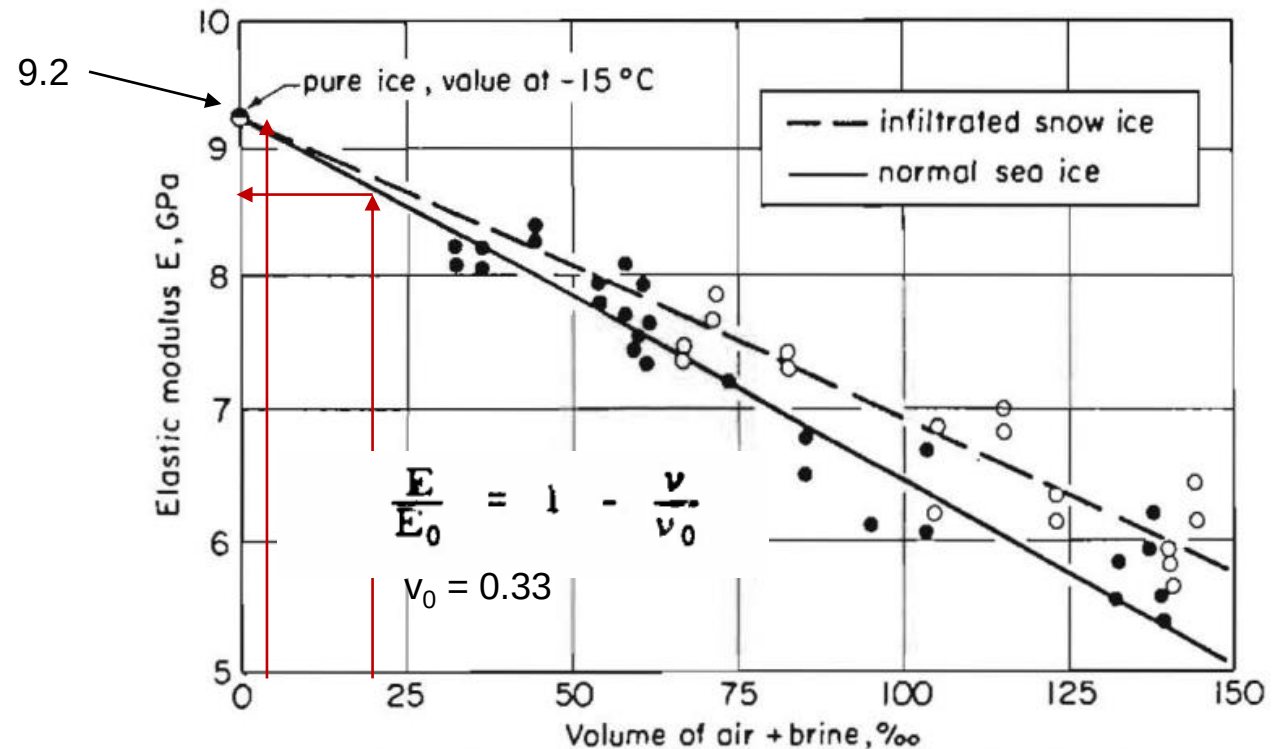


Fig. 3.10 — Elastic modulus vs volume of air plus brine, young sea ice.

(Tabata 1958, From Cammaert & Muggeridge 1988)

(Tabata, 1958)

(Nadreau & Michel, 1984)

Kimmokerroin E

- Johtopäätös:
 - -4 C asteinen rannikon murtoveden teräsjää (marmori) on lähes yhtä “jäykkää” kuin makea vesi (98% makeasta vedestä)
 - -1 C asteisena sen jäykkyys on 90% makean veden “jäykkyydestä”



Huokoisuus ja Lujuus

Huokoisuus ja Lujuus

Vetolujuus:

- Pienenee huokoisuuden kasvaessa
- Ei huokosia: 0.95 MPa
- Huokoisuus (20 ppt) 0.69 Mpa (73%)
- Huokoisuus (5 ppt) 0.82 Mpa (86%)

Puristuslujuus:

- Huokoisuuden vaikutus tunnetaan huonosti
- Alle 50 ppt Huokoisuudella ei ole vaikutusta “nopeaan” puristuslujuuteen (Schulson & Duval, 2009, p. 247)

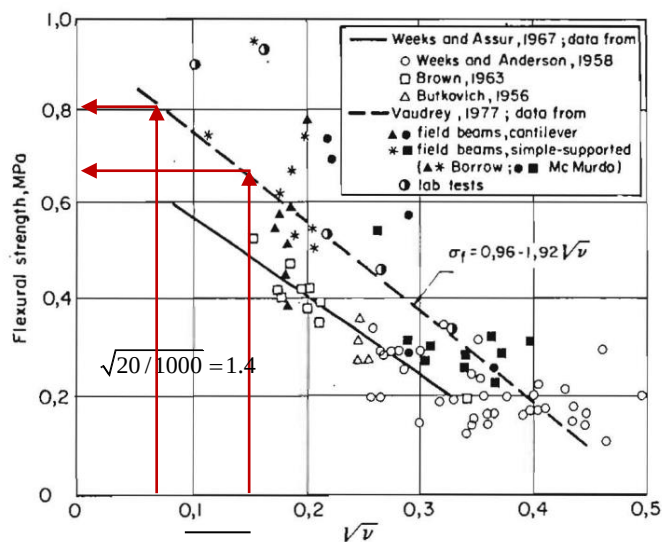
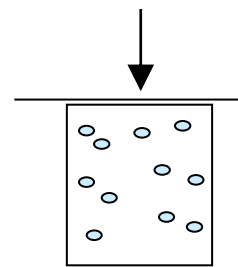


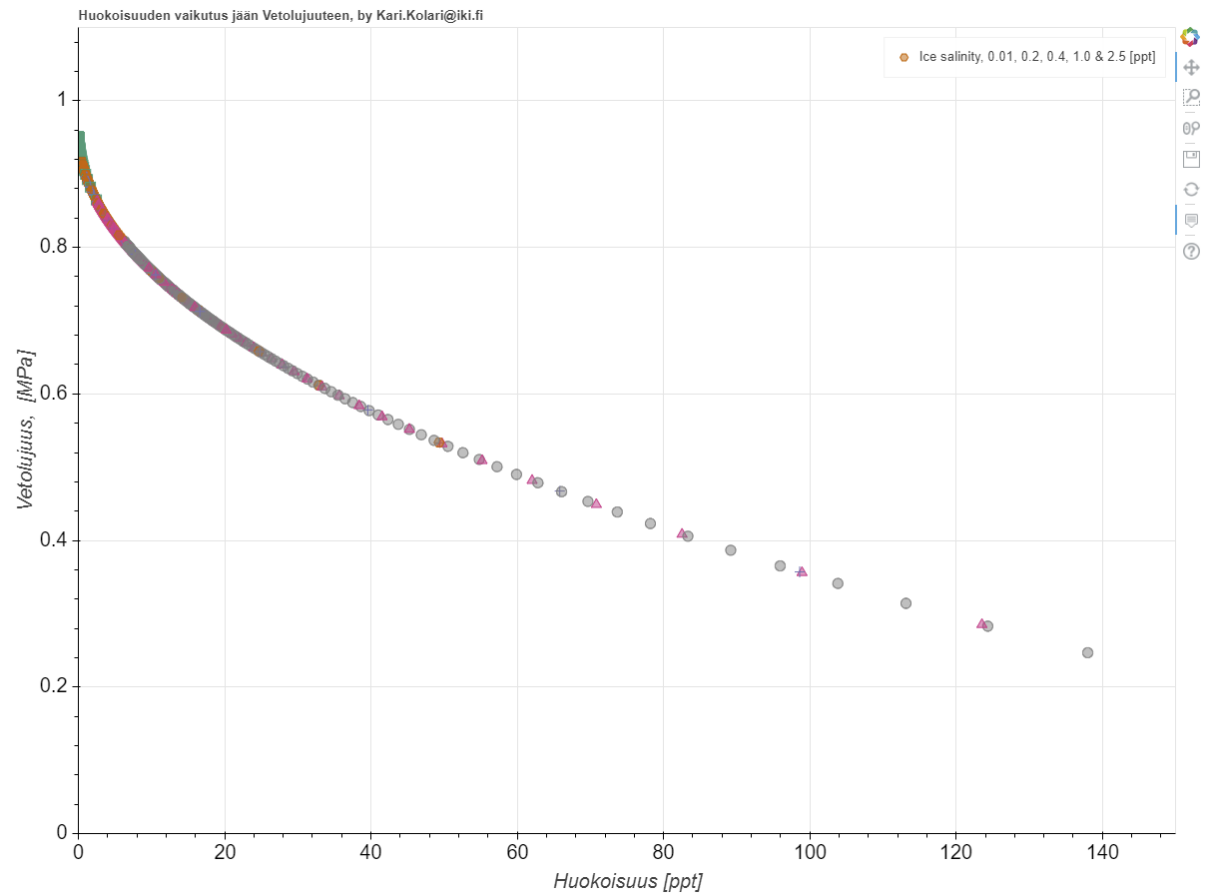
Fig. 3.8—Flexural strength of sea ice.

(Nadreau & Michel, 1984), kolari_porosity_strength.html



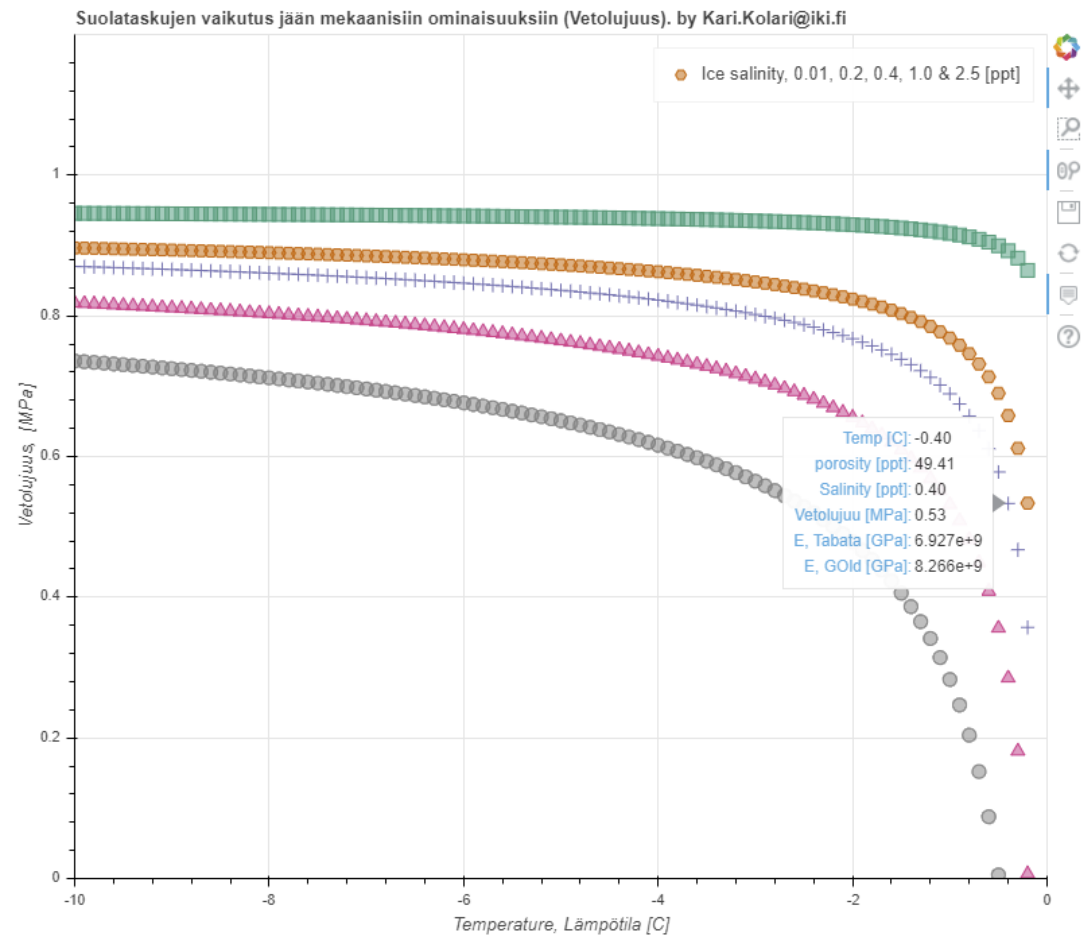
Huokoisuus – Taivutusvetolujuus

- Taivutusvetolujuus eri huokoisuuksilla (meri- ja järvijää)



Huokoisuus – Taivutusvetolujuus

- Taivutusvetolujuus eri suolapitoisuuksilla



Yhteenvedo - Huokoisuus

Huokoisuus

- Heikentää merijäätä ja järvijäätä samalla tavalla
 - Järvijäässä lämpötila ei vaikuta huokoisuuteen
- Mistä huokoisuus aiheutuu, ei ole olennaista (ilmakuplat ja suolataskut yhtä pahoja)



Yhteenveto - Huokoisuus

Huokoisuus (ilmakuplat ja suolataskut):

- Heikentää merijäätä ja järvijäätä samalla tavalla
 - Järvijäässä lämpötila ei vaikuta huokoisuuteen
- Mistä huokoisuus aiheutuu, ei ole olennaista (ilmakuplat ja suolataskut yhtä pahoja)
- Merijään erikoisuuksia
 - Merijäällä huokostilavuus riippuu lämpötilasta ja jäässä olevan suolan määrästä
 - Lähellä nollaa
 - huokostilavuus kasvaa nopeasti
 - Lujuus laskee nopeasti
 - Suola ei heikennä jäätä, suolan aiheuttama huokoisuus heikentää



Yhteenveto - Huokoisuus

Huokoisuus (ilmakuplat ja suolataskut):

- Heikentää merijäätä ja järvijäätä samalla tavalla
 - Järvijäässä lämpötila ei vaikuta huokoisuuteen
- Mistä huokoisuus aiheutuu, ei ole olennaista (ilmakuplat)
- Merijään erikoisuuksia
 - Merijäällä huokostilavuus riippuu lämpötilasta ja jäässä olevan suolan määrästä
 - Lähellä nollaa huokostilavuus kasvaa nopeasti
 - Suola ei heikennä jäätä, suolan aiheuttama huokoisuus heikentää
- Kylmä vähäsuolainen merivesi on mekaanisilta ominaisuuksiltaan lähellä makean veden ominaisuuksia



Sisältö

Kertaus:

- Jään rakenne, kasvu, suolaskut

Jään Lujuus

- Jään Muodonmuutosmekanismit
- Kidekoko
- Lämpötila
- Huokoisuus (merkittävä), suola

Murtovesi – Lämpölaajenemiskerroin

- Mikä se on?
- Miksi se on sama kuin makealla vedellä

Jääkokeita

Lämpölaajenemiskerroin

- Kappaleen koko vaihtelee lämpötilan mukaan
- Yleensä pituus kasvaa lämpötilan kasvaessa (positiivinen lämpölaajenemiskerroin):

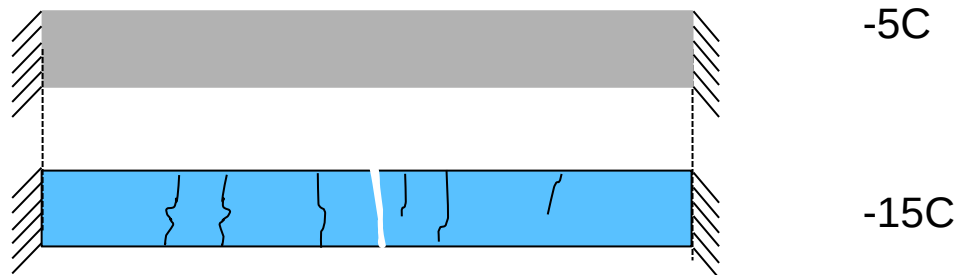


- Ja lyhenee lämpötilan laskiessa:



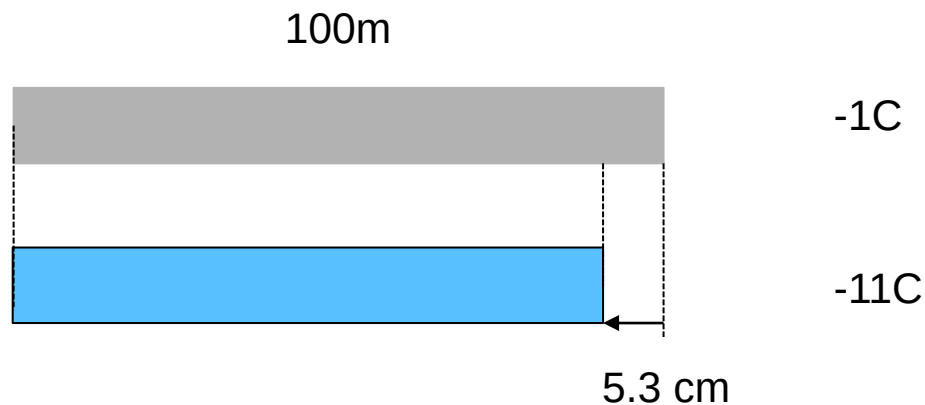
Lämpölaajenemiskerroin – estetty laajeneminen

- Jos kappale on kiinnitetty päistään, pituuden muutos ei ole mahdollista:
 - ➔ kappaleeseen syntyy vetojännityksiä
 - ➔ liian iso jännitys voi rikko kappaleen:



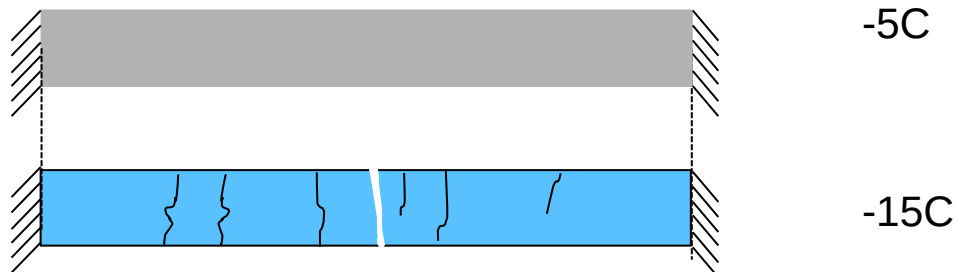
Lämpölaajenemiskerroin

- Lämpölaajenemiskerroin kuvaa pitenemistä ja lyhenemistä
- Jos lämpötila laskee kymmenen astetta 100 m leveä lampi jossa lämpötila laskee 10 astetta:
 - $100\text{m} * (10\text{C}) * 53 * 10^{-6} 1/\text{C} = 0.053\text{m}$
→ jää kutistuu 5,3 cm
jossa $53 * 10^{-6} 1/\text{C}$ on jään lämpölaajenemiskerroin



Lämpölaajenemiskerroin

- Lämpölaajenemiskerroin kuvaa pitenemistä ja lyhenemistä
- Jos lämpötila laskee kymmenen astetta 100 m pitkä jäälautta lyhenee
 - $100\text{m} \cdot (10\text{C}) \cdot 53 \cdot 10^{-6} \text{ 1/C} = 0.053\text{m}$
eli lyhenee 5,3 cm
jossa $53 \cdot 10^{-6}$ on jään lämpölaajenemiskerroin
- Jos lautta on jäätynyt rantoihin kiinni, se ei pääse kutistumaa
 - ➔ jäähän syntyy suuri vetojännitys
 - ➔ syntyy halkeamia ja railoja





2013. Pellinki



2018. Hanko

© Kari K



2019. Lauttasaari, Helsinki



2013. Emäsalo

© Kari Kolari



2016. Espoonlahti, Helsinki

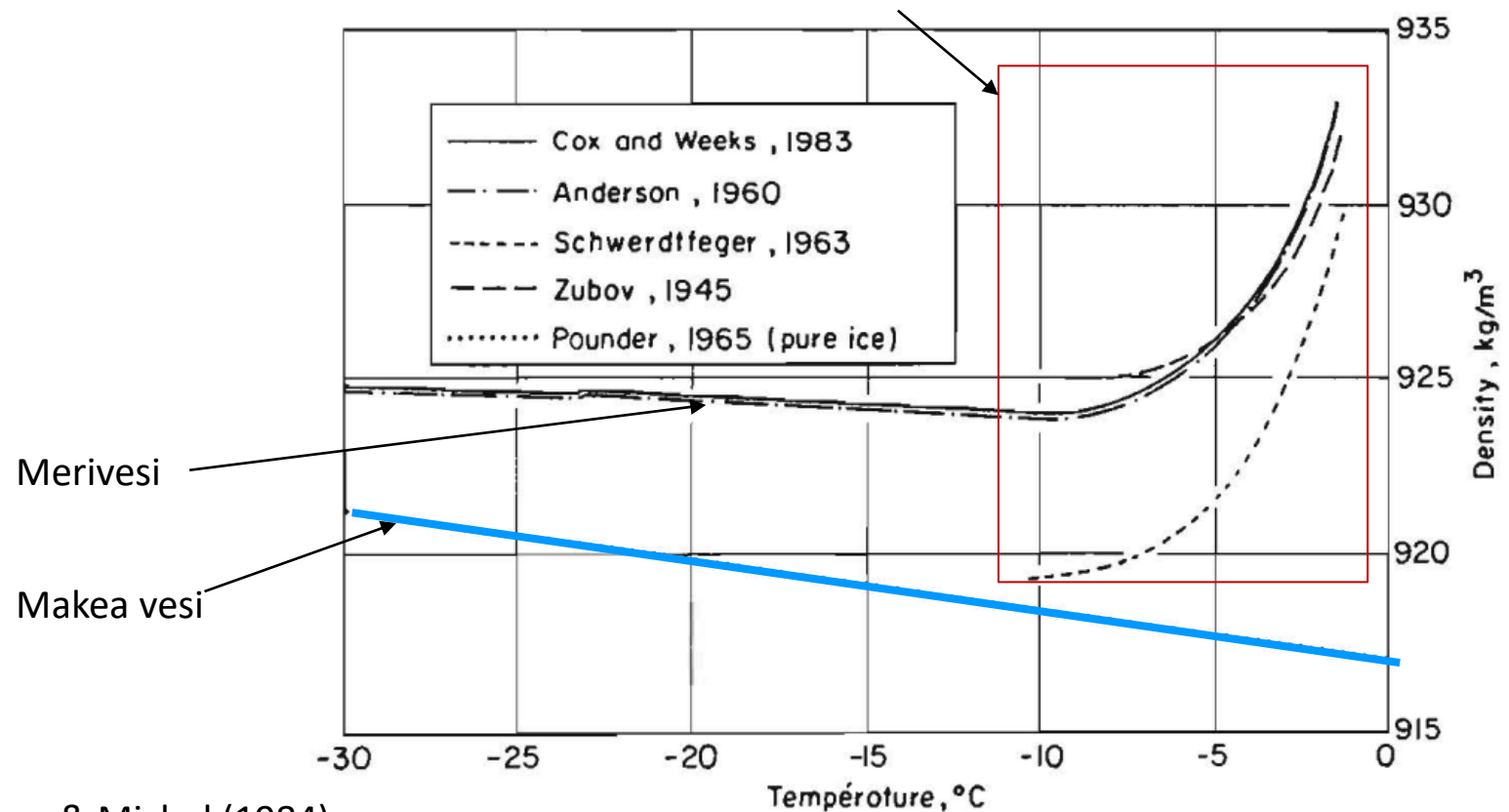
© Kari Kolari

Lämpölaajenemiskerroin – merivesi?

- Andersson (1960) osoitti (virheellisissä) laskelmissaan että merijään lämpölaajenemiskerroin vaihtelee useita kertalukuja ja voi olla positiivinen tai negatiivinen (Cox, 1983).

Lämpölaajenemiskerroin - merivesi

- Tiheydenmuutoksesta alueella -10...-1 C
➔ pääteltiin, että lämpölaajenemiskerroin on negatiivinen

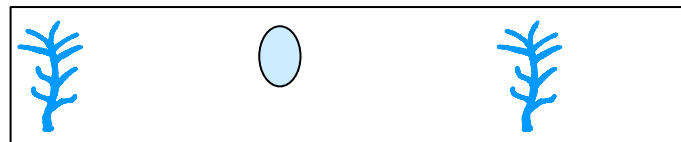


Kuva, Nadreau & Michel (1984)

Fig. 2.7—Density of columnar gas-free sea ice ($S = 5\%$)

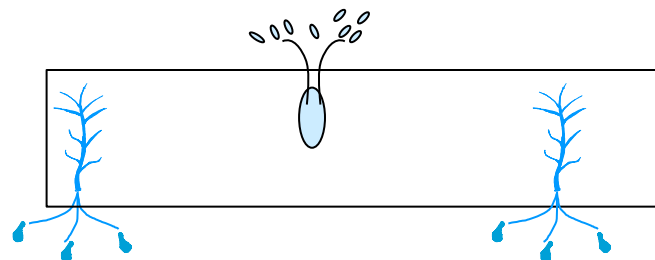
Lämpölaajenemiskerroin - merivesi

- Cox (1983): tiheydenmuutokseen liittyvä havainto on oikea, mutta johtopäätös virheellinen
 - Jää ei ole suljettu systeemi, se on yhteydessä mereen
 - Suolataskut ja kanavat osin tyhjenevät jään kylmetessä (→ tiheys laskee)



$T = -1\text{ C}$

- Jää jäähtyy ja kutistuu
- Vesi puristuu pois suolataskuista
- Seurauksena massan pientyminen

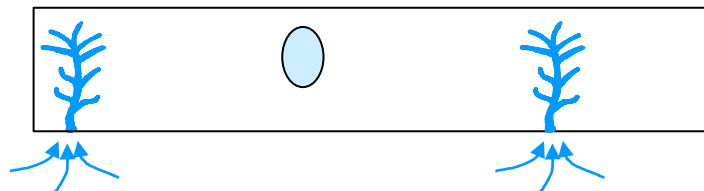
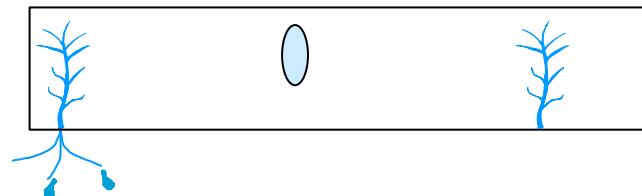


$T = -10\text{ C}$

Lämpölaajenemiskerroin - merivesi

- Cox (1983), ei kiistä tiheyden kasvua, muistutti: jää ei ole suljettu systeemi
 - Suolataskut/kanavat osin tyhjenevät jään kylmetessä (→ tiheys laskee)

- Jää lämpiää ja paisuu
- Suolakanaavat imevät merivettä sisäänsä (Johnson 1990)
- Jään massa kasvaa



Lämpölaajenemiskerroin - merivesi

- Cox (1983), ei kiistä tiheyden kasvua
- jää ei ole suljettu systeemi
 - Suolataskut/kanavat osin tyhjenevät jään kylmetessä (→ tiheys laskee)
 - Jään lämmitessä ja suolakanavat imevät sisäänsä merivettä → tiheys kasvaa
- **Johtopäätös:**
Lämpölaajenemiskerroin on sama kuin makealla vedellä

CONCLUSION

The coefficient of thermal expansion of NaCl ice and natural sea ice is the same as that of pure ice. (Cox 1983)

Lämpölaajenemiskerroin - merivesi

- Johnson & Metzner (1990), lämpölaajenemiskertoimen mittaus T:-4...-15 C
 - Jään suolapitoisuus 2 ppt* , ja 4 ppt
- Johnson & Metzner (1990): Merivedellä on sama lämpölaajenemiskerroin kuin makealla vedellä

Johnson and Metzner: Thermal expansion coefficients for sea ice

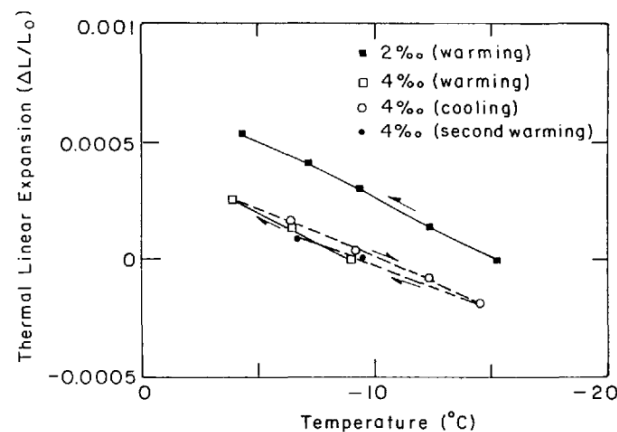


Fig. 4. Thermal linear expansion for sea ice. The arrows show the direction of temperature change during a test.

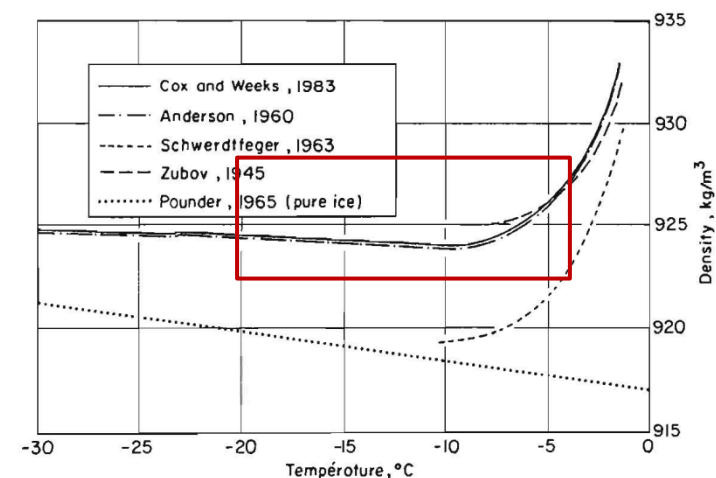


Fig. 2.7—Density of columnar gas-free sea ice (S = 5‰)

Lämpölaajenemiskerroin murtovesi = makea vesi

Itämerellä luisteleva luisteliija voi hyvillä mielin käyttää lämpölaajanemiskertoimelle kirjallisuudessa olevaa makean veden arvoa

$53 \times 10^{-6} \text{ 1/C}$ (makealle vedelle ja merivedelle)



Sisältö

Kertaus:

- Jään rakenne, kasvu, suolaskut

Jään Lujuus

- Jään Muodonmuutosmekanismit
- Kidekoko
- Lämpötila
- Huokoisuus (merkittävä), suola

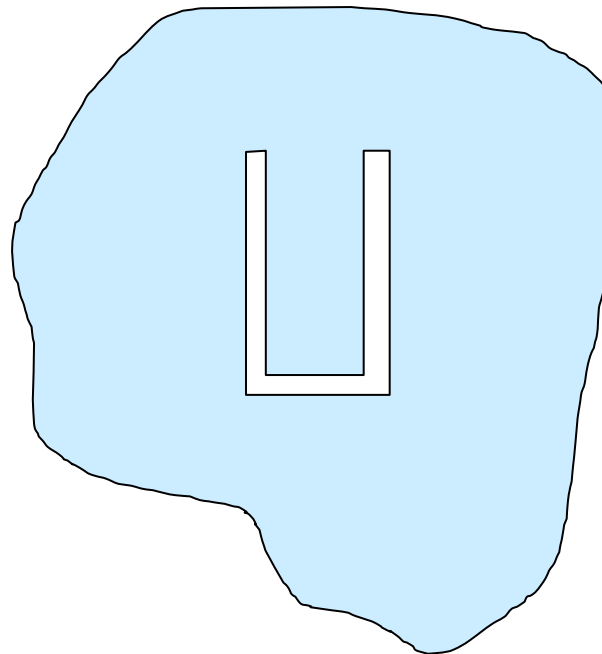
Murtovesi – Lämpölaajenemiskerroin

- Mikä se on?
- Miksi se on sama kuin makealla vedellä

Jääkokeita - lujuuden määrittämiseksi

Taivutusvetolujuus

- “Ulokepalkki”
 - Jäähän sahataan palkki
 - Rikotaan se taivuttamalla mitataan voima











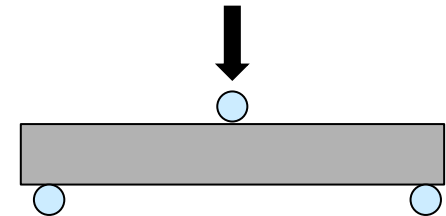






Taivutusvetolujuus

- “Kolmipistetaivutus”
 - Erityisesti jos jää on paksua (esim. 2 m)
 - Sahataan jäädä palki, ja koetaan se



Puristuslujuus

- Porataan näyte jääporalla
- Puristetaan näyte Rikki hydraulipuristimelle





<https://www.youtube.com/watch?v=16rO0KbPQSc>



Linkkejä & lähteitä

Lähteitä:

Ingolf Eide, L., & Martin, S. (1975). The Formation of Brine Drainage Features in Young Sea Ice. *Journal of Glaciology*, 14(70), 137–154.

<https://doi.org/10.3189/s0022143000013460>

Cammaert, A. B., & Muggeridge, D. B. (1988). Ice interaction with offshore structures. *Van Nostrand*

Cox, G. F. N. (1983). Thermal Expansion of Saline Ice. *Journal of Glaciology*, 29(103), 425–432.

<https://doi.org/10.3189/s0022143000030343>

De La Rosa, S., Maus, S., & Kern, S. (2011). Thermodynamic investigation of an evolving grease to pancake ice field. *Annals of Glaciology*, 52(57 PART 2), 206–214. <https://doi.org/10.3189/172756411795931787>

Hari, Jyrki. 2005. Jäitä pitkin. Rakennusalan kustantajat, 131 s. ISBN 951-664-159-8. <http://www.jyrkihari.kaapeli.fi/tilaus/setilauus.htm>

Iliescu, D., & Schulson, E. M. (2004). The brittle compressive failure of fresh-water columnar ice loaded biaxially. *Acta Materialia*, 52(20), 5723–5735. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.actamat.2004.07.027>

Johnson, J. B., & Metzner, R. C. (1990). Thermal Expansion Coefficients For Sea Ice. *Journal of Glaciology*, 36(124), 343–349.

<https://doi.org/10.3189/002214390793701327>

Kolari, K. (2017). A complete three-dimensional continuum model of wing-crack growth in granular brittle solids. *International Journal of Solids and Structures*, 115–116, 27–42. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2017.02.012>

Krupina et al 2007. Flexural Strength of Drifting Level First-year Ice In Barents Sea.

https://www.researchgate.net/publication/241783062_Flexural_Strength_of_Drifting_Level_First-year_Ice_In_Barents_Sea

Marchenko, A., Lishman, B., Wrangborg, D., & Thiel, T. (2016). Thermal Expansion Measurements in Fresh and Saline Ice Using Fiber Optic Strain Gauges and Multipoint Temperature Sensors Based on Bragg Gratings. *Journal of Sensors*, 2016.

<https://doi.org/10.1155/2016/5678193>

Linkkejä & lähteitä

....Lähteitä:

Maus, S., & De La Rosa, S. (2012). Salinity and solid fraction of frazil and grease ice. *Journal of Glaciology*, 58(209), 594–612.

<https://doi.org/10.3189/2012JoG11J110>

Nadreau, J. P., & Michel, B. (1984). Ice Properties in Relation to Ice Forces. *Proceedings of the 7th IAHR Ice Symposium*, 1984, Hamburg, Germany, 4, 63–115.

Schulson, E. M. (1990). The brittle compressive fracture of ice. *Acta Metallurgica Et Materialia*, 38(10), 1963–1976.

[https://doi.org/10.1016/0956-7151\(90\)90308-4](https://doi.org/10.1016/0956-7151(90)90308-4)

Schulson, E. M., & Duval, P. (2009). *Creep and Fracture of Ice*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511581397>

Tabata, T., Fujino, K., & Aota, M. (1966). Studies of the Mechanical Properties of Sea Ice XI: The Flexural Strength of Sea Ice in situ. *International Conference on Low Temperature Science. I. Conference on Physics of Snow and Ice, II. Conference on Cryobiology*, 539–550. https://eprints.lib.hokudai.ac.jp/dspace/bitstream/2115/20323/1/1_p539-550.pdf

Timco, G. W., & Weeks, W. F. (2010). Cold Regions Science and Technology A review of the engineering properties of sea ice. *Cold Regions Science and Technology*, 60(2), 107–129. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2009.10.003>

Vainio, J. 2002. Jääsanasto-Sea ice nomenclature : English-Finnish-Swedish-Estonian-Russian. *Merenkulkuhallitus*. 3/2002.

<https://www.doria.fi/handle/10024/141965>

Weeks, W. F., & Ackley, S. F. (1982). The Growth, Structure, and Properties of Sea Ice. In *The Geophysics of Sea Ice: Vol. CRREL Mono*. U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory (CRREL). https://doi.org/10.1007/978-1-4899-5352-0_2 link: <https://erdc-library.erdc.dren.mil/jspui/handle/11681/2661>

Weeks, W. F., & Assur, A. (1967). The mechanical properties of sea ice: Vol. CRREL. Col. U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory (CRREL). <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/AD0662716.pdf>

MUUTA

Jään luokittelu (P1, P2 P3,..), sanastoja: http://erules.veristar.com/dy/data/bv/pdf/565-NI_2010-09.pdf

Luulajan Majakka/jääkuormat [linkki](#); Suolapitoisuus ([mittauksia](#)); Double refraction [Wikipedia](#); Hyydejäättä Vesijärvellä [Youtube](#); WMO Sea-Ice Nomenclature ([linkki](#)); Brine Drainage, Youtube [linkki](#); haurasmurtuma: <https://www.youtube.com/watch?v=16rOOkbPQSc>

A photograph of a snowy landscape with large, rounded ice formations under a clear blue sky. The ice formations are white and yellowish, with some visible layers. The ground is covered in a layer of snow. The sky is a clear, bright blue.

Kiitos ja mukavaa
Illanjatkoa!