



Vaasan yliopisto  
UNIVERSITY OF VAASA

Masi Rosendahl

## **Jään Ultraäänimittaus**

Technology and Innovation  
Masters in Smart Energy  
Robotics

Vaasa 2026

---

**VAASAN YLIOPISTO****Technology and Innovation**

<b>Tekijä:</b>	Masi Rosendahl		
<b>Tutkielman nimi:</b>	Jään Ultraäänimittaus: mahdollinen tarkentava alaotsikko		
<b>Tutkinto:</b>	Esimerkkitieteiden maisteri		
<b>Koulutusohjelma:</b>	Masters in Smart Energy		
<b>Opintosuunta:</b>	Robotics		
<b>Työn ohjaaja:</b>	Timo Mantere		
<b>Valmistumisvuosi:</b>	2026	<b>Sivumäärä:</b>	64

---

**TIIVISTELMÄ:**

Jään pinnalta tapahtuvaa, liikuteltava ja rikkomatonta, mittauslaitteistoa ei ole ympäristöntutkimuskäytössä Pohjois-Euroopassa, joten opinnäytetyön puitteissa haluttiin selvittää ultraäänitutkimukseen käytettävien laitteistojen soveltuvuus vesistön jääkerroksen vahvuuden mittaukseen. Tavoitteena oli löytää mittaukseen soveltuva laitteisto, sekä arvioida mittaustarkkuus ja olosuhteiden vaikutus mittaukseen.

Johdannossa ja teoriaosuudessa käsitellään merijääkerrosten mittaustapoja ja ultraäänitekniikan keksimisen historiaa sekä kiinteiden aineiden akustiikkaa. Akustiikan teoriaosuudessa käydään läpi pitkittäisen ja poikittaisen aaltoliikkeen mekaniikkaa ja siihen liittyvät keskeiset käsitteet, kuten tiheys, kimmomoduuli, aallonpituus, äänen nopeus, akustinen impedanssi, läpäisy ja heijastuminen rajapinnoilla sekä vaimeneminen eli absorptio ja sironta.

Akustinen impedanssi on kiinteän aineen tärkein yksittäinen ominaisuus ultraäänitarkastuksen kannalta. Ultraäänien läpäisyä ja heijastumista mallinnetaan matemaattisesti eri aineiden impedanssierolla. Impedanssierot määrittää paljonko ääniaallosta heijastuu takaisin ja paljonko ääniaallon energiasta siirtyy rajapinnan läpi. Mikäli impedanssierot ovat erittäin suuret esimerkiksi 1000-kertainen, kuten teräksen ja ilman rajapinnassa, heijastuu ääniaalto käytännössä kokonaan takaisin. Mikäli impedanssierot ovat alle 10-kertainen, kuten anturin kosketuspinnan ja jään tapauksessa, läpäisee ääniaalto rajapinnan lähes kokonaan. Näin impedanssierot mahdollistavat ultraääniaallon etenemisen ja heijastumisen ja mittauksen onnistumisen.

Teoriaosuudessa käsitellään myös ultraääniantureiden rakennetta ja pietsosähköisen ilmiön laskentaa, materiaaleja ja sovelluksia. Pietsosähköisen ilmiön, eli materiaalin kyky muuttaa sähköinen varaus mekaaniseksi venymäksi ja toisin päin, mekaanisen jännityksen muuttuminen sähköiseksi varaukseksi, matemaattinen mallinnus perusyhtälöillä selitetään ja sen keskeisinä käsitteinä mainitaan pietsosähköinen kerroin, elastisuuskerroin ja dielektrisyyskerroin. Ultraääniantureiden rakenne ja tärkeät komponentit sisältävät pietsosähköisen elementin lisäksi sovituspinnan, akustisen linssin ja taustaelementin. Näiden tarkoituksena on tuottaa sopiva ja mahdollisimman tasomainen, pitkittäinen ultraääniaalto.

Jään ultraäänimittaus onnistui kohtuullisen hyvin, hyvällä tarkkuudella, metalliteollisuuteen tarkoitettulla materiaalintarkastuslaitteistolla Krautkramer USM 35. Jään vahvuuden mittaus ei onnistunut sisäelinten lääketieteelliseen tutkimukseen tarkoitettulla laitteistolla Philips Ultrasound CX50.

---

**AVAINSANAT:** Jää, Ultraääni, Akustiikka, Ainevahvuus, Impedanssi, Aaltoliike, Pietsosähköinen ilmiö

## Sisällys

1	Johdanto	7
1.1	Lähtökohdat	7
1.2	Tavoitteet	7
1.3	Rikkomattomat menetelmät	8
1.3.1	Akustinen menetelmä	8
1.3.2	Radiologinen ja magneettinen menetelmä	9
1.4	Menetelmän valinta	10
2	Ultraäänen teoria ja historia	11
2.1	Ultraäänen keksiminen ja ensimmäiset sovellukset	11
2.2	Ultraäänen mekaniikka	12
2.3	Äänen nopeus kiinteässä aineessa	14
2.4	Akustisen aallon pituus jään sisällä	16
2.5	Taajuuden merkitys mittauksessa	17
2.5.1	Aallonpituus	17
2.5.2	Kohdistettavuus	17
2.5.3	Mittausaika	17
2.6	Ultraäänen paine ja energia	18
2.7	Rajapinnat	19
2.8	Useat rajapinnat, levyt ja raot	21
2.9	Viisto tulokulma ja refraktio	22
2.10	Heijastuminen kulmissa	24
2.11	Ääniaaltokentän fysiikka Fresnelin mukaan	25
2.12	Vaimeneminen, absorptio ja sironta	28
3	Ultraäänianturin rakenne ja toiminta	30
3.1	Pietsosähköiset materiaalit	30
3.2	Pietsosähköisen ilmiön laskenta	32
3.3	Ultraäänianturin rakenne	33

4	Tutkimuksen toteutus	36
4.1	Käytössä oleva laitteisto	36
4.1.1	Krautkramer USM 35	36
4.1.2	Philips Ultrasound CX50	37
4.2	Alustava kokeilu	38
4.3	Virhelähteiden arviointi	41
4.3.1	Testikappaleiden virheet	41
4.3.2	Vertailumittauksen virheet	43
4.3.3	Mittalaitteen ja anturin virheet	43
4.4	Testikappale	44
5	Mittaukset	46
5.1	Mittalaitteen asetukset	46
5.2	Mittaustulokset	47
5.3	Tulosten arviointi	52
6	Yhteenveto	56
6.1	Aiheen valinta	56
6.2	Kirjallisuuskatsaus	56
6.3	Tietopohja	57
6.4	Tulokset	57
6.4.1	Käytetyt mittalaitteistot ja niiden soveltuvuus	57
6.4.2	Mittaustarkkuus	58
6.4.3	Tarkkuuteen vaikuttavat tekijät	58
6.5	Sovellukset ja mahdollisuudet	59
6.5.1	Käyttö referenssinä	59
6.5.2	Paikallisuus	60
6.5.3	Liikuteltavuus	60
6.5.4	Automatisointi	60
	Lähteet	61

## Kuvat

Kuva 1. Havainnekuva molekyylihilasta (Krautkrämer & Krautkrämer, 1990).	13
Kuva 2. Kolmiulotteinen havainnekuva jään molekyylihilasta ( <a href="https://emmakemia.blogspot.com/2014/">https://emmakemia.blogspot.com/2014/</a> ).	13
Kuva 3. Havainnekuva ääniaallon etenemisestä pitkittäisenä aaltoliikkeenä (Krautkrämer & Krautkrämer, 1990).	19
Kuva 4. Äänenpaineen heijastuminen teräs - vesi rajapinnasta. Äänen tulosuuntana teräs (a) ja vesi (b). (Krautkrämer & Krautkrämer, 1990).	21
Kuva 5. Heijastuminen ja refraktio vinolla kohtaamiskulmalla materiaalien rajapinnassa.	22
Kuva 6. Heijastuminen kulmissa; yksittäinen säde (a) ja säteiden sarja (b). (Krautkrämer & Krautkrämer, 1990).	24
Kuva 7. Valokuva ääniaaltokentästä ultraäänilähteen edessä. (Krautkrämer & Krautkrämer, 1990).	25
Kuva 8. (a) Verkko- ja (b) vektorirakenteinen havainnekuva ääniaaltokentästä ultraäänilähteen edessä, kun lähettimen halkaisija on vain muutaman kerran isompi kuin aallonpituus. (Krautkrämer & Krautkrämer, 1990).	27
Kuva 9. Bariumtitanaatin kiderakenteen kolmiulotteinen havainnekuva. (Krautkrämer &	31
Kuva 10. Bariumtitanaatin kiderakenteen kaksiulotteinen havainnekuva polarisaatiosta.	31
Kuva 11. Rakennekuva materiaalitarkastukseen tarkoitettusta ultraäänianturista. ( <a href="https://radiopaedia.org/articles/ultrasound-transducer">https://radiopaedia.org/articles/ultrasound-transducer</a> ).	34
Kuva 12. Rakennekuva sisäelinten tutkimukseen tarkoitettusta ultraäänianturista. ( <a href="https://www.probomedical.com/learn/blog/why-does-an-ultrasound-probe-need-matching-layers/">https://www.probomedical.com/learn/blog/why-does-an-ultrasound-probe-need-matching-layers/</a> ).	34
Kuva 13. Materiaalitestaukseen tarkoitettu ultraäänilaite. ( <a href="https://www.ebay.com/itm/326630950799">https://www.ebay.com/itm/326630950799</a> )	36
Kuva 14. Materiaalitestaukseen tarkoitettu ultraäänianturi.	37
Kuva 15. Sisäelinten tutkimukseen tarkoitettu ultraäänilaite.	38

Kuva 16. Alustavaa kokeilua materiaalintestauslaitteella.	39
Kuva 17. Alustavaa kokeilua sisäelinten ultraäänitutkimuslaitteella.	40
Kuva 18. Testikappaleen jäädytyksen aikana syntyneitä muodonmuutoksia.	41
Kuva 19. Testikappaleen sisään jääneet ilmakuplat ja niiden alueellisuus.	42
Kuva 20. Testikappale 1.	44
Kuva 21. Testikappale 1.	45
Kuva 22. Mittalaitteen asetukset.	46
Kuva 23. Taulukon 2 mittauspisteet ja -tulokset piirretty geometrisesti oikeille paikoilleen.	49
Kuva 24. Taulukossa 4 punaisella korostetun sisäisen virheen valokuva.	50
Kuva 25. Testikappale asetettu veteen.	51
Kuva 26. Taulukon 5 arvot graafisena kuvaajana.	55

## Taulukot

<b>Taulukko 1.</b> Aallonpituuden ja taajuuden yhteys.	16
<b>Taulukko 2.</b> Suurimman läpimitan mittaustulokset.	49
<b>Taulukko 3.</b> Testikappaleen leveyden mittaustulokset. Punaisella korostettu sisäisen virheen antama tulos.	49
<b>Taulukko 4.</b> Testikappaleen lyhimmän leikkauksen mittaustulokset, vedessä kelluen.	50
<b>Taulukko 5.</b> Mittausten erotus ja virhe.	54

## Lyhenteet

<b>NDT</b>	Non-Destructive Testing, ainetta rikkomaton testaus
<b>IWI</b>	International welding inspector, kansainvälinen hitsaustarkastaja
<b>SAR</b>	Synthetic aperture radar, synteettisen aukon tutka

# 1 Johdanto

## 1.1 Lähtökohdat

Ilmastonmuutoksen myötä sään ja jääkerrosten paksuuden ennustaminen on vaikeutunut ja on syntynyt tarve liikuteltavaan, nopeaan ja jatkuvaan jääkerrosten mittaamiseen. Jääolosuhteiden seuraaminen on tärkeää mm. liikenteen, teollisuuden ja ympäristön seurannan kannalta (Ronkainen et al. 2018; Haas 1998).

Perinteisesti jääkerroksen paksuutta on mitattu mekaanisesti tai veden pohjaan asennettavalla mittalaitteella, mutta nämä ovat joko hitaita, rikkovia tai pääsy tuloksiin on mahdotonta, kunnes jäät sulavat. Jääkerroksien mittauksessa käytetään myös elektromagneettisia menetelmiä, joihin perustuu Ronkaisen ym. (2018) koostama tutkimus kiinto- ja ajojään vahvuuksista vuosina 2003–2016.

Tässä tutkimuksessa pyritään selvittämään, kuinka tarkasti ja luotettavasti ultraäänianturi kykenee mittaamaan veden päällä olevan jääkerroksen paksuutta eri olosuhteissa. Liikuteltavien ultraääniantureiden käyttö tarjoaa mahdollisuuden reaaliaikaiseen, rikkomattomaan ja automaattiseen mittaukseen.

## 1.2 Tavoitteet

Opinnäytetyön tavoitteena on tutustua kiinteän aineen akustisiin ominaisuuksiin, ultraäänitekniikan historiaan, nykytietämykseen ja uusimpiin tutkimuksiin. Uusia tutkimuksia on tehty 2020-luvulla valtavasti ja niitä löytyy julkaisutietokannoista satoja, rajallisten resurssien takia vain joihinkin on mahdollisuus tutustua opinnäytetyön puitteissa.

Tavoitteena on myös arvioida menetelmiä, jolla ultraäänianturin avulla voidaan mitata jääkerroksen paksuus luotettavasti.

### **Tutkimuskysymykset:**

1. Millä käytössä olevalla laitteistolla jään paksuuden mittaaminen on mahdollista?
2. Kuinka tarkasti ultraäänianturi mittaa jääkerroksen paksuutta?
3. Mitkä tekijät (esim. ympäristön olosuhteet, pinnan karheus, jään koostumus, anturin tyyppi) vaikuttavat mittauksen tarkkuuteen?

### **1.3 Rikkomattomat menetelmät**

Materiaalin testaus- tarkastus- ja tutkimusmenetelmät ovat jaoteltu karkeasti rikkoviin ja rikkomattomiin menetelmiin. Rikkovia menetelmiä, esimerkiksi vetokoe tai iskutestaus, käytetään kun halutaan selvittää tietyn tuotteen tai materiaalin mekaanisia ominaisuuksia. Rikkovia kokeita varten on tutkittavasta tuotteesta tehtävä koepaloja, joiden muodon määräävät kyseisen kokeen määrittelevät standardit.

Rikkomattomat menetelmät ovat nimensä mukaisesti niitä testausmenetelmiä, joiden käytön jälkeen tutkittava kohde on edelleen käyttökelpoinen. Rikkomattomia menetelmiä käytetään laajasti teollisuudessa, rakennustekniikassa ja liikennevälineiden tarkastuksissa. Tarkastuksia käytetään laadunvalvonnassa valmistuksen yhteydessä ja käytön aikana tuotteen turvallisen käyttökunnon varmistamiseksi. Tyypillisiä rikkomattomia menetelmiä, joilla voidaan selvittää ainevahvuuksia tai materiaalin sisäisiä virheitä ovat akustiikkaan, magnetismiin tai radiologiaan perustuvat menetelmät.

#### **1.3.1 Akustinen menetelmä**

Ultraääneen, eli akustiikkaan perustuvan, mittauksen erinomaisuus piilee siinä, että akustinen aaltoliike etenee aineen omien molekyylien värähtelynä ja suurena heijastumisena kiinteän ja nestemäisen tai kaasumaisen aineen rajalta tai säröjen rajapinnoilta. Näin ollen ultraääni soveltuu erinomaisesti materiaalien sisäisen rakenteen, halkeamien

ja paksuuden mittaukseen. Lisäksi menetelmä toimii useissa eri väliaineissa, kunhan niiden äänennopeus tunnetaan tai mittauslaite voidaan kalibroida mekaanisella mittauksella varmistettuna.

### **1.3.2 Radiologinen ja magneettinen menetelmä**

Radiologisella lähteellä kuten isotoopilla tai röntgenillä tuotettu signaali vaimenee tehokkaasti kiinteässä ja nestemäisessä aineessa. Vaikka tällaisin menetelmin teollisuudessa tutkitaan jatkuvasti kiinteän kappaleen sisäistä rakennetta, vaativat ne vastaanotettavan filmin tai vastaanottimen tutkittavan kappaleen vastakkaisella puolella. Vedellä jähmettyneen jääkerroksen mittauksessa filmin asettaminen jään alle lienee mahdotonta jäätä rikkomatta.

SAR-mittausta varten ovat Karvonen ja Cheng (2024) kehittäneet algoritmin, joka huomioi kyseisen mittauksen haasteet. SAR (synthetic aperture radar) toimii mikroaaltoalueella ja lähetin-vastaanotin-laitteisto on sijoitettu satelliittiin. (Karvonen & Cheng, 2024). Mikroaaltotutkan tavalla toimiva laitteisto voi mitata merijääkerroksen vahvuutta tiettyyn rajaan asti. Noin puolimetriä lienee maksimi vahvuus, koska mikroaallot siroavat paksumman jään sisällä eivätkä enää heijastu takaisin satelliittiin. Mittaus vaatii myös muita mittaustapoja kalibrointia varten, eikä yksistään sovellu jään mittaukseen. Mittaustulokset vaativat runsaasti jälkikäsitteilyä (De Carolis et al., 2021). Mittaustapa on kuitenkin erittäin mielenkiintoinen, toimii ohuelle merijälle, pimeässä ja pilvien läpi ja mahdollistaa suurten alueiden lähes reaaliaikaisen mittauksen. (Karvonen & Cheng, 2024).

Magneettinen tarkastusmenetelmä on erinomainen magneettisten metallien pintasäröjen havaitsemiseen, mutta nimensä mukaisesti vaatii tutkittavan aineen magneetoitumisoimaisuutta. Valmistavan teollisuuden käytössä olevilla magneettitarkastuslaitteilla ei voi mitata ainevahvuutta. Jää ei myöskään magnetoidu, eikä reagoi magneettikenttään, joten teollinen magneettitarkastus ei sovellu jääkerroksen vahvuuden mittaukseen.

Elektromagneettisella lähettimellä ja vastaanottimella on mitattu merijäiden vahvuuksia vuosikymmenten ajan kuten voi todeta Haasin suorittamista useista merijäätutkimuksista joka puolella pohjoista pallonpuoliskoa (Ronkainen et al. 2018). Elektromagneettisella mittauksella saavutetaan luokkaa 0,1 m tarkkuus. Mutta tulos on alueellinen keskiarvo, ja alue riippuvainen mittalaitteen etäisyydestä (Ward & Hohmann, 1988). Helikopterimittauksiin perustuvat tutkimukset ovat nopeita ja niillä voidaan suorittaa tutkimuksia riittävällä tarkkuudella suurelta pinta-alalta. (Kovacs & Holladay, 1990). Myös laivoihin asennettuja elektromagnetismiin perustuvia mittalaitteita käytetään ilmastontutkimuksissa, kuten Ronkaisen et al. koostamassa pitkän ajan jään vahvuuden tutkimuksessa 2018.

Elektromagneettisen mittausjärjestelyn haasteena on laitteistoa kuljettavan aluksen käyttäminen; laitteistosta on hyötyä vain, jos laiva pystyy kulkemaan jäässä tai on hankittava riittävän isoa kuormaa kannattava lentävä alus. Haasin tutkimuksessa 2006 laitteisto oli rakennettu lennokkiin, joka painoi 100 kg ja sitä lennätettiin helikopterilla. Laitteiston mittasuhteet aiheuttavat rajoitteet liikuteltavuudelle.

#### **1.4 Menetelmän valinta**

Ultraäänilaitteiden saatavuus ja edullisuus puoltavat jään vahvuuden mittausta, opinnäytetyön puitteissa, nimenomaan akustisella menetelmällä eli ultraäänisignaalilla. Ultraäänilaitteen tarvitsema sähköenergia on mahdollista tuottaa pienellä akulla, joten se soveltuu sekä laboratorio, että kenttätutkimuksiin (Krautkrämer & Krautkrämer, 1990). Ultraäänilaitteita on saatavilla kirjoittajan työpaikalla ja lähipiiristä ilman rahallista panostusta opinnäytetyöhön.

## 2 Ultraäänen teoria ja historia

### 2.1 Ultraäänen keksiminen ja ensimmäiset sovellukset

Ultraäänten olemassaolo on havaittu jo satoja vuosia ennen sen sovellusten kehittämistä. Muusikot ovat huomanneet, että soittimia voi virittää paljon korkeammille taajuuksille, mitä ihmiskorva pystyy havaitsemaan. Marin Mersenne on tehnyt matemaattiset laskelmat taajuuden, pituuden ja jännityksen suhteesta ja julkaissut tutkimustulokset jo vuonna 1636 (Benson, D. 2007). Tätäkin aiemmin on Francis Bacon tutkinut värähtelyn riippuvuutta värähtelijän ominaisuuksista ja havainnut värähtelyjä syntyvän myös kuuloalueen ulkopuolella. Hänen tutkimuksensa on julkaistu vuosi hänen kuolemansa jälkeen vuonna 1627 (Bacon, F. 1627).

Robert Hooke on osoittanut kokeellisesti, että ääni syntyy värähtelevistä kappaleista ja taajuus voi olla niin korkea, että ihminen ei voi sitä kuulla (Hooke, R. 1665). Hän on myös käyttänyt ilmaisua "ultrahigh frequency", vaikka "ultrasonic" eli "ultraääni" -termin käyttö syntyi vasta 1900-luvulla (Langevin, P. 1918).

Ultraäänisovellukset pohjautuvat suurimmaksi osaksi edelleen pietsosähköiseen ilmiöön, jonka ovat havainneet Pierre ja Jacques Curie. Curien veljekset havaitsivat esimerkiksi kvartsikiteen tuottavan sähkövarauksen, kun siihen kohdistuu voima ja vastaavasti muuttavan muotoa, kun siihen kohdistetaan jännite (Curie & Curie, 1880).

Ensimmäisen maailmansodan aikana Ranskassa aloitettiin etsimään kunnollista ratkaisua saksalaisten sukellusveneiden havaitsemiseen veden alla. Kuuluisa tiedemies Paul Langevin määrättiin työskentelemään ongelman pariin. Paul Langevin kehitti maailman ensimmäisen ultraäänigeneraattorin ja ultraäänianturin, jotka perustuivat pietsosähköisen ilmiön periaatteeseen (Langevin, 1918).

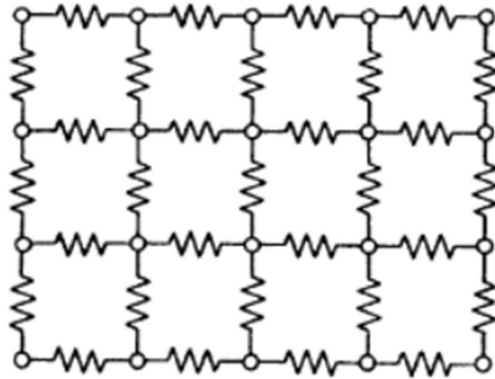
Kiinteiden aineiden ultraäänimittauksen voi katsoa syntyneen Sergei Sokolovin tutkimuksista 1928. Hän oli ensimmäinen, joka sovelsi Langevin ultraäänikaiutusta metalliosien sisäisten virheiden havaitsemiseen (Krautkrämer & Krautkrämer, 1990).

40-luvulla amerikkalainen fyysikko Floyd Firestone kehitti kaupallisen sovelluksen, joka perustui aivan samaan tekniikkaan kuin Sokolovin tutkimukset. Hänen laitteensa, "Supersonic Reflectoscope", on ensimmäinen kaupallinen versio NDT-tarkastuksissa käytettävistä ultraäänilaitteista (Firestone, 1945). Lääketieteessä ultraäänen käyttö alkoi 1950-luvulla, kun skotlantilainen Ian Donald kehitti ultraäänitutkimuksen (ultrasonografian) siikiöiden ja sisäelinten kuvantamiseen (Donald et al., 1958).

## **2.2 Ultraäänen mekaniikka**

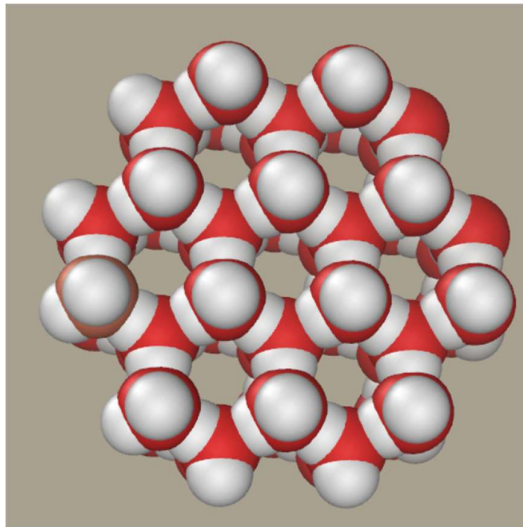
Ultraääni on mekaanista aaltoliikettä, joka syntyy molekyylien paikallisesta värähtelystä ja värähtelyn siirtymisestä painevaihteluna molekyylien välisten elastisten voimien välityksellä. Ultraääniaallon nopeus ja käyttäytyminen määräytyvät materiaalin ominaisuuksista, kuten kimmomoduulista ja tiheydestä (Krautkrämer & Krautkrämer, 1990).

Kun aineeseen kohdistuu pieni, vaihtuva jännitys, syntyy elastinen aalto, joka etenee aineen sisällä kimmomoduulin ja tiheyden määräämällä nopeudella. Kiinteissä aineissa voi esiintyä kahta päätyyppiä mekaanisia aaltoja: pitkittäisiä ja poikittaisia. Pitkittäisaalloissa hiukkasliike tapahtuu aallon etenemissuunnassa, kun taas poikittaisaalloissa hiukkasliike on etenemissuuntaan nähden kohtisuoraa (Landau & Lifshitz, 1986).



**Kuva 1.** Havainnekuva molekyylihilasta (Krautkrämer & Krautkrämer, 1990).

Kuva 1 esittää molekyylihilaa yksinkertaisena kaksiulotteisena matriisina, jossa jokainen molekyyli on sidoksissa lähimpään molekyyliin 90 asteen välein. Todellisuudessa molekyylihilat ovat kolmiulotteisia ja paljon monimutkaisempia.



**Kuva 2.** Kolmiulotteinen havainnekuva jään molekyylihilasta (<https://emmakemia.blogspot.com/2014/>).

Kuvassa 2 havainnoidaan jäätyneen veden molekyylien järjestymistä avaruushilaan ja sidosten välisiä avaruuskulmia. Vaikka jään molekyyli rakenne on mutkikkaampi kuin kuvassa 1, eikä molekyylit ole järjestäytyneet suoraviivaisesti riveihin ja sarakkeisiin, on

akustisen aallon pitkittäisessä ja poikittaisessa etenemisessä kuitenkin selkeä nopeusero (Landau & Lifshitz 1986).

Kuvaa 1 tarkasteltaessa on helppo hahmottaa pitkittäisen ja poikittaisen aaltoliikkeen erilainen eteneminen aineen sisällä; kuvitellaan toiseksi alimman rivin vasemmanpuoleisen molekyylin asemaa poikkeutettavan vaakasuoraan ulkoisella, mekaanisella, voimalla. Tällöin molekyylin oikealla puolella oleva jousi puristuu suoraviivaisesti, kun taas ylä- ja alapuolella olevat jouset venyvät ja kääntyvät. Kun poikkeuttamisen voima poistuu, molekyyli palaa tasapainoasemaan ja sen ohi, jousiin latautuneen energian vaikutuksesta. Nyt oikealla puolella oleva jousi venyy ja siirtää liike-energiaa seuraavaan molekyyliin, tämä on pitkittäistä aaltoliikettä. Poikittainen aaltoliike etenee aina seuraavan ylä- tai alapuolella olevaan molekyyliin aseman poikittaisena, eli vaakasuorana liikkeenä. Poikittaista aaltoliikettä ei esiinny nesteessä eikä kaasussa, koska näillä ei ole leikkauslujuutta, ts. pystyjouset puuttuvat (Landau & Lifshitz 1986).

Huygensin periaatteen mukaan jokainen aaltorintaman piste voidaan ajatella uuden toissijaisen aallon lähteeksi, ja näiden toissijaisten aaltojen yhteisvaikutus muodostaa uuden aaltorintaman (Huygens, 1690; Kinsler et al., 2000; Krautkrämer & Krautkrämer, 1990).

### 2.3 Äänen nopeus kiinteässä aineessa

Landau ja Lifshitz (1986) johtavat elastisuusteoriasta äänen etenemisen perusyhtälöt. Pitkittäiselle aallolle nopeus voidaan esittää muodossa

$$v_L = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (1)$$

ja poikittaiselle aallolle vastaavasti

$$v_T = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}, \quad (2)$$

missä  $\lambda$  ja  $\mu$  ovat Lamén vakiot, ja  $\rho$  on materiaalin tiheys. Näistä saadaan yksisuuntaista jännitystilaa tarkasteltaessa yksinkertaistettu muoto pitkittäisaalloille:

$$v_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (3)$$

jossa  $E$  on kimmomoduuli. Ja poikittaisaalloille:

$$v_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}}, \quad (4)$$

Jossa  $G$  on liukumoduuli.

Kaavan perusteella voidaan todeta, että äänen nopeus kasvaa jäykemmällä (suurempi kimmomoduuli) ja kevyemmällä (pienempi tiheys) materiaaleilla. Siksi esimerkiksi alumiinissa ääni etenee nopeammin kuin teräksessä, vaikka sen kimmomoduuli on pienempi, niin tiheys on vielä alhaisempi.

Jää on kiinteä aine kuten metallit, joten ääni voi edetä sekä pitkittäis- että poikittaisaalloina, joiden nopeudet eroavat toisistaan merkittävästi.

Vogt, Laihem ja Wiebusch (2008) tutkivat äänen nopeutta kuplattomassa jäässä laboratorio-olosuhteissa lämpötila-alueilla 0 °C ... -20 °C. Heidän mittaustensa perusteella pitkittäisaallon nopeus oli noin 3 870 m/s ja poikittaisaallon noin 1 970 m/s lämpötilassa -20 °C. Tutkimuksessa havaittiin lisäksi, että äänen nopeus kasvaa lievästi lämpötilan laskiessa, 3 850 m/s → 3 900 m/s, mikä johtuu jään jäykkyyden noususta lämpötilan laskun myötä, nolasta -20 °C:een. Samalla lämpötila-alueella poikittaisaallon nopeus kasvoi noin 1 850 m/s → 1 970 m/s. Tämä tarkoittaa, että äänen nopeuden muutos on luokkaa 1–2 % / 20 °C.

Smith ja Kishoni (1987) mittasivat äänen nopeutta jäässä NASA:n tutkimuksessa käyttäen pitkittäis- ja poikittaisaaltoja erillisissä mittausrjestelyissä. Heidän tuloksensa osoittivat, että äänen nopeus jäässä on tyypillisesti 3 200–4 000 m/s riippuen lämpötilasta, jään tiheydestä ja rakenteesta. Lisäksi tutkimuksessa todettiin, että jään sisäiset halkeamat ja

epäjatkuvuudet voivat aiheuttaa huomattavaa hajontaa mitatuissa nopeuksissa, erityisesti jos jää on syntynyt luonnonolosuhteissa eikä ole täysin homogeenista.

## 2.4 Akustisen aallon pituus jään sisällä

Signaalin aallonpituuteen vaikuttaa taajuus ja nopeus. Aallonpituus [mm] lasketaan kaavalla:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (5)$$

Jossa  $c$  on äänen nopeus [km/s] ja  $f$  on taajuus [MHz]. Joten laskettaessa 2MHz:n anturilla ja 3800 m/s etenemisnopeudella, aallon pituus on 1,9 mm. Taajuutta muuttamalla olisi mahdollista järjestää ”seisova aalto” tutkittavan kappaleen sisään, jolloin signaali voimistuisi ja ainevahvuuden mittausta olisi mahdollisesti tarkempi. Kiinnostava jään vahvuus, 50–200 mm, on kuitenkin niin suuri, että taajuuden olisi oltava todella matala, jotta vain yksi aalto mahtuisi kappaleen sisään. Taulukkoon 1 on laskettu aallonpituuksia eri taajuudella ja yhdellä äänen nopeudella kaavan (5) mukaisella yhtälöllä.

**Taulukko 1. Aallonpituuden ja taajuuden yhteys.**

Nopeus, $c[\frac{km}{s}]$	Taajuus, $f[MHz]$	Aallon pituus, $\lambda[mm]$
3,8	2	1,9
3,8	0,1	38
3,8	0,076	50
3,8	0,05	76
3,8	0,019	200
3,8	0,01	380

Säädettävällä taajuudella tapahtuvan mittauksen tarkkuus olisi suuresti riippuvainen taajuuden säädön tarkkuudesta.

Säädettäviä ultraääniantureita on todella olemassa, mutta niiden käyttämisessä tarvitaan juuri tietyille anturille tarkoitettu erikoislaitteisto. Tavanomaiset kiinteään aineen

NDT-tutkimuksessa käytettävät ultraäänianturit perustuvat sisäänrakennetun pietsokiteen rakenteen ominaisvärähtelytaajuuteen. Anturit ovat ikään kuin viritetty tietylle taajuudelle, eivätkä pysty tuottamaan tai tunnistamaan eri taajuisia signaaleja (Krautkrämer & Krautkrämer 1990).

## **2.5 Taajuuden merkitys mittauksessa**

### **2.5.1 Aallonpituus**

Ultraäänien korkea taajuus merkitsee lyhyttä aallonpituutta. Kiinteässä aineessa pienetkin sisäiset virheet, kuten huokokset, havaitaan vain, jos niiden koko on samaa suuruusluokkaa tai suurempi kuin käytetty aallonpituus. Vain ultraäänien lyhyt aallonpituus mahdollistaa pienten poikkeamien havaitsemisen (Krautkrämer & Krautkrämer 1990).

### **2.5.2 Kohdistettavuus**

Korkeataajuisella ultraäänellä voidaan muodostaa kapea, suunnattava akustinen keila, joka mahdollistaa tarkasti hallitun etenemissuunnan materiaalin sisällä ja ainevahvuuden mittausta tai sisäisten huokosten paikannusta on tarkkaa. Matalataajuisella äänellä tällainen kohdistaminen ei ole mahdollista, koska matalataajuinen ääni heijastuu ja poukkoilee materiaalissa liian kauan, eli vaimenee liian hitaasti. Aivan kuten äänentoistolaitteiston bassoalueen äänen tulosuuntaa ei ihmiskorva pysty erottamaan sisätiloissa (Krautkrämer & Krautkrämer 1990).

### **2.5.3 Mittausaika**

Ultraäänianturin toiminta perustuu ”värähtelypaketin” tuottamiseen ja vastaanottamiseen ja lähetyksen ja vastaanoton välillä kuluneesta ajasta ja tunnetusta äänen nopeudesta lasketaan signaalin kulkema matka. Mitä matalampi taajuus, sitä ajallisesti pidempi paketti, epämääräisempi aika lähetyksen ja vastaanoton välillä, ja jälleen epätarkempi mittausta (Krautkrämer & Krautkrämer, 1990).

## 2.6 Ultraäänen paine ja energia

Ultraäänen voimakkuus kiinteässä aineessa lasketaan mekaanisen aaltoliikkeen välittämänä energiana, eikä äänenpainetasona ihmisen kuuloaistin viitearvon mukaisesti kuten ilma-akustiikassa. Kiinteässä väliaineessa etenevän aallon energia määräytyy hiukkasten värähtelynopeuden ja materiaalin akustisen impedanssin perusteella. Akustinen impedanssi määritellään yhtälöllä

$$Z = \rho \cdot c, \quad (6)$$

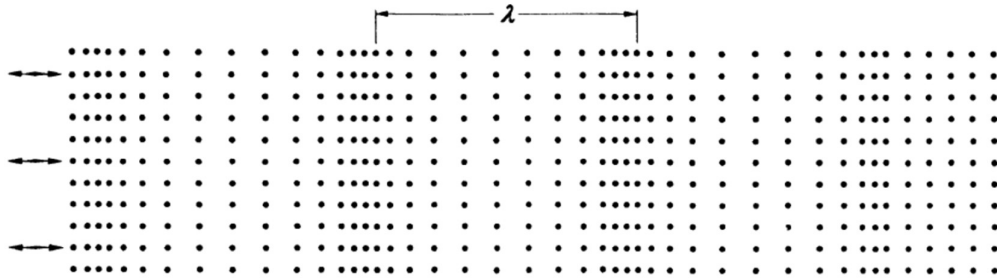
Impedanssi on ikään kuin äänenvastus, mitä tiheämpi aine ja suurempi nopeus, sitä suurempi impedanssi. Teräksellä ( $Z = 45 \cdot 10^6 \text{ Ns/m}^3$ ) on korkea tiheys ja äänennopeus, jolloin sen impedanssi on suurempi kuin esimerkiksi vedellä ( $Z = 1,5 \cdot 10^6 \text{ Ns/m}^3$ ). Eri-laisia materiaaleja kutsutaan "akustisesti koviksi" tai "pehmeiksi" materiaaleiksi (Krautkrämer & Krautkrämer, 1990). Jään impedanssi on näillä kaavoilla laskettuna noin.  $920 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 3900 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 3,5 \cdot 10^6 \text{ Ns/m}^3$ .

Ultraäänen paine [ $Pa$ ] kiinteässä aineessa lasketaan pitkittäisille tasoaalloille impedanssin, kulmanopeuden  $\omega$  [ $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$ ] ja partikkelin amplitudin  $\xi$  [ $m$ ] tulona:

$$p = Z\omega\xi. \quad (7)$$

Joskus on myös tarpeen selvittää äänen intensiteetti, joka voidaan laskea paineen ja impedanssin avulla:

$$J = \frac{1}{2} * \frac{p^2}{Z} = \frac{1}{2} * Z * \omega^2 * \xi^2. \quad (8)$$



**Kuva 3.** Havainnekuva ääniaallon etenemisestä pitkittäisenä aaltoliikkeenä (Krautkrämer & Krautkrämer, 1990).

Kuvassa 3 on pyritty esittämään pitkittäisen tasoallon amplitudi sellaisena kuin se todellisuudessa etenee, mutta valtavalla suurennoksella. Kuvassa amplitudi on luokkaa 10 % aallon pituudesta. Todellisuudessa esimerkiksi teräksen molekyyleihin ultraäänianturi voi tuottaa värähtelyamplitudin, joka on noin 2 miljoonasosaa aallon pituudesta (Krautkrämer & Krautkrämer, 1990). Jos sama paine saadaan aikaiseksi jähän ja teräkseen, niin voidaan laskea jään molekyylien amplitudi.

## 2.7 Rajapinnat

Kun ultraääniaalto etenee yhdestä aineesta toiseen kohtisuorasti, sen käyttäytyminen rajapinnalla määräytyy aineiden akustisten ominaisuuksien erosta. Rajapintaan osuva aaltoliike jakautuu kahteen osaan: heijastuneeseen aaltoon ja läpäisseeseen aaltoon. Heijastumisen ja läpäisyn voimakkuudet määräytyvät aineiden akustisen impedanssin mukaan. Heijastuneen ja läpäisseen aallon paineen välinen suhde saadaan johtamalla rajapinnan jatkuvuusehdoista (paineen ja hiukkasnopeuden jatkuvuus). Tällöin heijastuskerroin  $R$  ja läpäisykerroin  $T$  voidaan ilmaista muodossa

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}, \quad (9)$$

$$T = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1}, \quad (10)$$

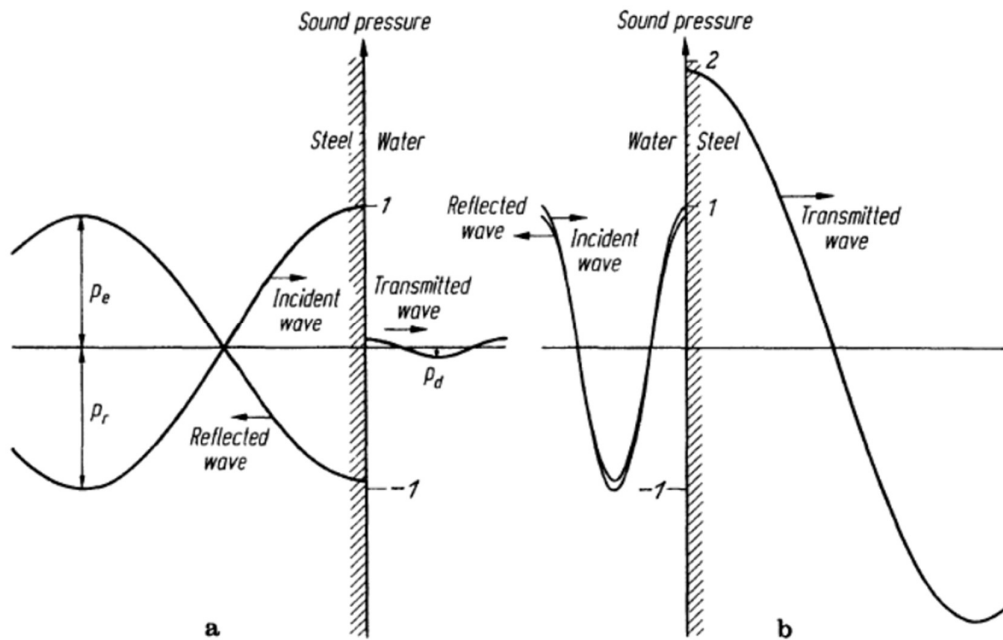
missä  $Z_1$  ja  $Z_2$  ovat aineiden akustiset impedanssit. Kun tasoaalot kohtaavat rajapinnan, jossa aineiden impedanssit eroavat, osa energiasta heijastuu takaisin lähteeseen ja osa siirtyy toiseen aineeseen. Anturin kosketuspinta on yleensä polymeeria tai epoksia, joiden impedanssi on välillä  $(2 \dots 3) * 10^6 \text{Ns/m}^3$ , eli hyvinkin samaa luokkaa kuin jään impedanssi. Tämä selittää erinomaisesti, miksi ultraäänimittaus toimii niin hyvin jäälle, kuten myöhemmin mittauksissa todetaan. Jos aineiden impedanssit ovat ihan samat ( $>0$ ), tulee heijastuskertoimesta 0 ja läpäisykertoimesta 1. Vastaavasti heijastus materiaalin loppurajalta on suuri, koska kiinteän materiaalin ja ilman impedanssiero on huomattava. Tämä mahdollistaa ultraäänimittaukset ylipäänsä.

Energiatasolla tarkasteltuna heijastuneen ja läpäisseen energian osuudet saadaan neliöllisellä amplitudisuhteet:

$$R_E = \left( \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2, \quad (11)$$

$$T_E = 1 - R_E. \quad (12)$$

Näin voidaan arvioida, kuinka suuri osa akustisesta energiasta siirtyy toiseen aineeseen ja kuinka suuri osa heijastuu takaisin. Jos rajapinnan materiaalit ovat akustisesti hyvin erilaisia (esimerkiksi teräs ja ilma),  $Z_2 \gg Z_1$ , niin heijastuskertoimen itseisarvo lähenee yhtä. Tällöin lähes kaikki energia heijastuu takaisin rajapinnasta, eikä käytännössä mitään kulje läpi. Tämä on syy siihen, miksi ultraäänimittauksissa tarvitaan kytkentäaine, kuten vesi, öljy tai geeli. Kytkentäaine poistaa ilmarakoja ja vähentää impedanssihyppyä anturin ja mitattavan pinnan välillä, jolloin ääni voi siirtyä tehokkaasti kappaleeseen.



**Kuva 4.** Äänenpaineen heijastuminen teräs - vesi rajapinnasta. Äänen tulosuuntana teräs (a) ja vesi (b). (Krautkrämer & Krautkrämer, 1990).

Heijastus- ja läpäisykertoimet käytännössä muodostavat ultraäänimittauksen matemaattiset perusteet ja impedanssierot sekä mahdollistavat signaalin siirtymisen anturista tutkittavaan kappaleeseen että aiheuttavat heijastuksen, joka voidaan anturilla havaita ja käyttää ainevahvuuden mittauksessa (Krautkrämer & Krautkrämer, 1990).

## 2.8 Useat rajapinnat, levyt ja raot

Kun ultraääniaalto kulkee eri materiaalien läpi, rajapintojen kautta, signaalin tulkinta muuttuu monimutkaisemmaksi. Jokainen rajapinta heijastaa ja läpäisee osan äänienergiasta, ja nämä heijastukset voivat vahvistaa tai vaimentaa kokonaisamplitudia. Tämä ilmiö on erityisesti huomioitava ohuiden kerrosten kuten pinnoitteiden kohdalla.

Useammankin kerroksen paksuus voidaan selvittää ultraäänianturilla varsin yksinkertaisesti. Ensimmäinen heijastus vastaa kerroksen etupintaa, toinen takapintaa, ja seuraavat heijastukset muodostuvat aallon edestakaisesta kulusta levyn sisällä. Tämä synnyttää

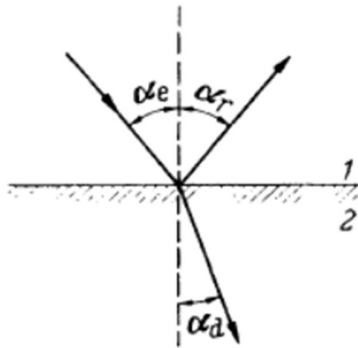
sarjan pulssikaikuja, joiden väliset aikaerot ovat suoraan verrannollisia levyn paksuuteen. Eri kerrosten ainevahvuus  $s$  voidaan laskea aikaerosta  $\Delta t$ :

$$s = \frac{c \Delta t}{2}, \quad (13)$$

Jos kerrosten väliin jää ilmarakoja, signaali heijastuu lähes kokonaan takaisin, koska ilman impedanssi on alle tuhannesosa kiinteistä aineista. Tällöin lähes koko äänienergia heijastuu takaisin eikä signaali etene. Ilmarakoja voidaan etsiä esimerkiksi pinnoitteen ja perusaineen rajalta, jolloin huonosti kiinnittynyt pinnoite havaitaan helposti (Krautkrämer & Krautkrämer, 1990).

## 2.9 Viisto tulokulma ja refraktio

Kun ultraääniaalto kohtaa rajapinnan vinossa kulmassa, aaltoliike ei heijastu ja läpäise rajapintaa niin yksinkertaisesti kuten kohtisuoraan saapuessaan. Ääni taittuu eli refraktoi kulkiessaan toiseen aineeseen, ja lisäksi rajapinnassa voi tapahtua tyyppimuutos (mode change), jossa pitkittäisaalto synnyttää poikittaisaaltoja tai päinvastoin.



**Kuva 5.** Heijastuminen ja refraktio vinolla kohtaamiskulmalla materiaalien rajapinnassa.

(Krautkrämer & Krautkrämer, 1990).

Äänen eteneminen rajapinnan molemmin puolin määräytyy aineiden akustisista ominaisuuksista ja tulokulmasta. Jos ääni saapuu rajapintaan kulmassa  $\theta_1$  ja läpäisee sen kulmassa  $\theta_2$ , taittumisen suhdetta kuvaa Snellin laki, joka on voimassa sekä ääni- että valosignaaleille:

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{c_1}{c_2}, \quad (14)$$

missä  $c_1$  ja  $c_2$  ovat äänennopeudet aineissa. Jos ääni kulkee hitaammasta aineesta nopeampaan, taittumiskulma  $\theta_2$  kasvaa tulokulmaa suuremmaksi. Kun tulokulma suurenee riittävästi, taittunut aalto etenee rajapinnan suuntaisesti, eikä sen jälkeen siirry enää toiseen aineeseen vaan heijastuu kokonaan takaisin. Tätä ilmiötä kutsutaan kokonaisheijastukseksi. Kriittinen kulma voidaan laskea kaavalla

$$\sin \theta_c = \frac{c_1}{c_2}, \quad (15)$$

kun  $c_2 > c_1$ .

Kun pitkittäisaalto saapuu vinosti kiinteän aineen rajapintaan, osa sen energiasta muuttuu poikittaisaaloksi. Tätä ilmiötä kutsutaan tyyppimuutokseksi, ja se on seurausta rajapinnan mekaanisista jatkuvuusehdoista: rajapinnassa on säilyttävä sekä normaali- että tangentialinen jännitys. Tällöin Snellin laki pätee erikseen kummallekin aaltotyypille:

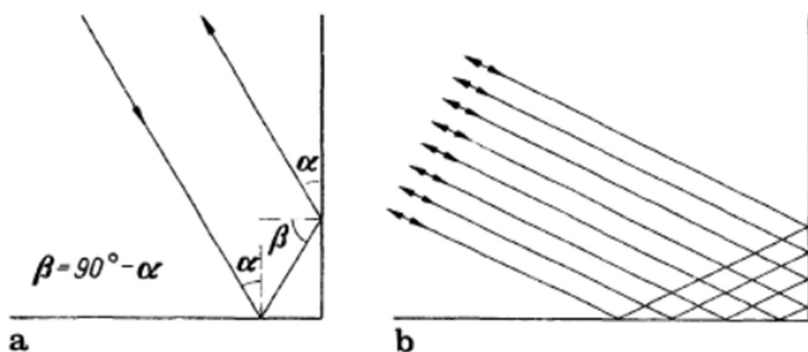
$$\frac{\sin \theta_i}{c_L} = \frac{\sin \theta_t}{c_T}, \quad (16)$$

missä  $c_L$  on pitkittäisaallon nopeus ja  $c_T$  poikittaisaallon nopeus aineessa. Jos ääni tulee esimerkiksi vedestä teräkseen, suuren äänennopeuseron takia jo pieni tulokulma aiheuttaa kokonaisheijastuksen. Tällöin taittunut pitkittäisaalto katoaa ja jäljelle jää vain poikittainen aalto, joka etenee teräksessä tietyssä kulmassa rajapintaan nähden. Tämä huomioidaan kulma-antureita suunniteltaessa, niillä ultraääni suunnataan tarkoituksellisesti vi-

nosti pintaan, jotta poikittisaalto etenee tarkasteltavaan materiaaliin ja heijastus paljastaa virheitä esimerkiksi hitsaussauman juuresta (Krautkrämer & Krautkrämer, 1990). Käytännön kokeissa eri taajuisia kulma-antureita voidaan testata, vaikkei niiden toimiminen olekaan oleellista jään vahvuuden mittauksessa.

## 2.10 Heijastuminen kulmissa

Kun ultraääniaalto kohtaa kappaleen reunan tai nurkan, sen käyttäytyminen poikkeaa yksinkertaisesta tasopinnan heijastuksesta. Suorakulmainen reuna aiheuttaa äänen moninkertaisia heijastuksia, taipumista ja mahdollisesti myös poikittisaaltojen syntymistä riippuen tulokulmasta ja materiaalin ominaisuuksista. Tätä ilmiötä esiintyy erityisesti silloin, kun tutkittavassa kappaleessa on porauksia, uria tai teräviä paksuuden vaihteluita.

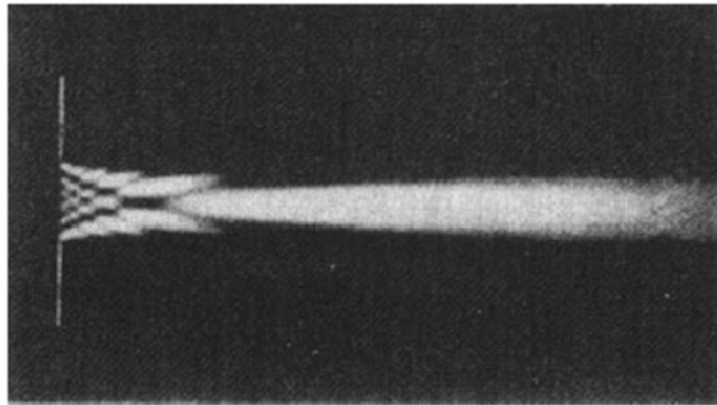


**Kuva 6.** Heijastuminen kulmissa; yksittäinen säde (a) ja säteiden sarja (b). (Krautkrämer & Krautkrämer, 1990).

Suorakulmaisesta kulmasta heijastuessaan, ääni palaa tulosuuntaan. Tätä heijastusta hyödynnetään rakenteen geometrian ja sisäisten virheiden tunnistamiseen erityisesti hitsaussaumoissa, joiden taustapuolelle ei ole pääsyä. (Krautkrämer & Krautkrämer, 1990).

## 2.11 Ääniaaltokentän fysiikka Fresnelin mukaan

Ultraäänianturin lähettämä aaltokenttä ei ole äärettömän tarkasti rajattu tai ideaalinen tasoaalto, vaan sen rakenne määräytyy sekä anturin geometrian että aallon diffraktion perusteella. Fresnelin mukaan jokainen aaltorintaman piste toimii toissijaisen aallon lähteenä, ja näiden toissijaisten aaltojen yhteisvaikutus muodostaa kokonaiskentän tietyssä pisteessä. Tätä kutsutaan Fresnelin periaatteeksi, ja se täydentää Huygensin periaatetta ottamalla huomioon eri osien väliset vaihe-erot.



**Kuva 7.** Valokuva ääniaaltokentästä ultraäänilähteen edessä. (Krautkrämer & Krautkrämer, 1990).

Kun ääni etenee rajalliselta lähettimeltä (kuten anturin pietsosähkölevyltä), sen aaltorintama ei ole täysin tasomainen, vaan muodostaa alueen, jossa äänen intensiteetti ja vaihe vaihtelevat etäisyyden ja sijainnin mukaan. Tämä kenttä voidaan jakaa kahteen pääalueeseen: lähi- eli Fresnel-alueeseen ja kauko- eli Fraunhofer-alueeseen.

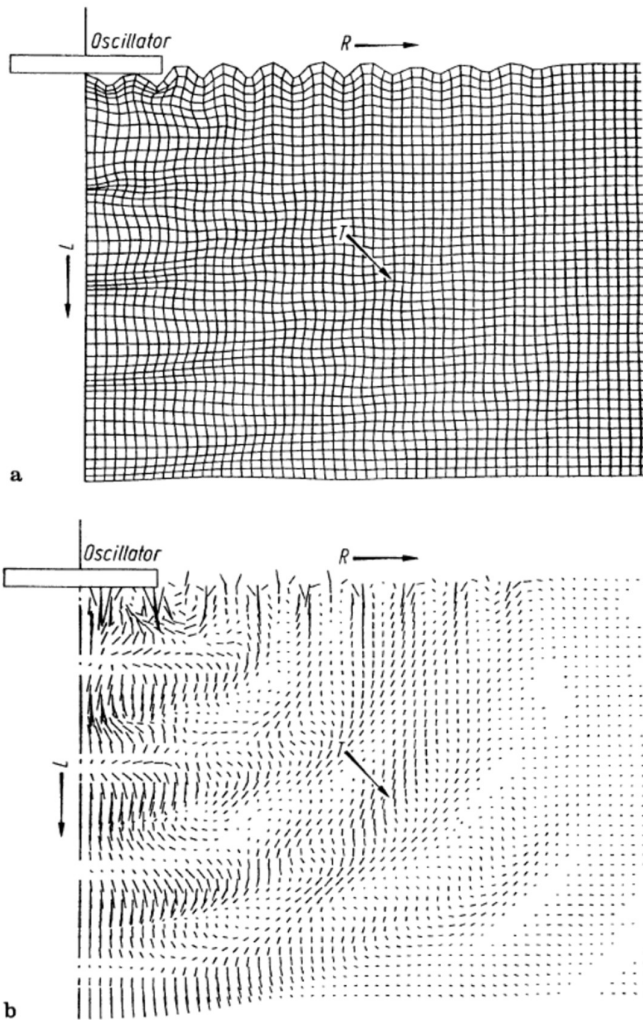
Lähi-alueella kentän rakenne on sekava: interferenssi eri aaltorintaman osien välillä aiheuttaa intensiteettivaihtelua ja seisovien aaltojen kaltaisia maksimeja ja minimejä. Tällä alueella äänen intensiteetti ei vähene tasaisesti etäisyyden kasvaessa. Lähi-alueen pituutta voidaan arvioida kaavalla

$$N = \frac{D^2}{4\lambda}, \quad (17)$$

jossa  $D$  on anturin halkaisija ja  $\lambda$  on aallonpituus. Tämä etäisyys kuvaa aluetta, jolla säteilykenttä ei ole vielä täysin vakiintunut. Kun etäisyys lähettimestä ylittää Fresnel-alueen pituuden, ääni siirtyy kaukoalueelle. Kaukoalueella aaltorintama voidaan arvioida tasomaiseksi, ja äänen intensiteetti pienenee suurin piirtein verrannollisesti etäisyyden ne-  
liöön. Tällä alueella säteen suuntaus ja avautumiskulma  $\alpha$  riippuvat anturin halkaisijan ja aallonpituuden suhteesta, ja sitä voidaan arvioida kaavalla

$$\sin \alpha = 1.22 \frac{\lambda}{D}. \quad (18)$$

Tämä ilmaisee, että pienemmillä antureilla ja pidemmällä aallonpituuksilla säde leviää enemmän. Suurempi anturi tai korkeampi taajuus tuottaa kapeamman ja tarkemmin suunnatun äänikeilan.



**Kuva 8.** (a) Verkko- ja (b) vektorirakenteinen havainnekuva ääniaaltokentästä ultraäänilähteen edessä, kun lähettimen halkaisija on vain muutaman kerran isompi kuin aallonpituus. (Krautkrämer & Krautkrämer, 1990).

Fresnelin teoria mahdollistaa myös äänikentän numeerisen mallintamisen. Äänenpaine missä tahansa pisteessä voidaan laskea integroimalla kaikki lähettimen pinnan osat ja niiden vaihe-erot.

Fresnelin analyysi selittää hyvin todellisten antureiden käyttäytymisen: miksi äänen intensiteetti vaihtelee epäsäännöllisesti lähellä anturia ja miksi kauempana havaitaan tasaisempi, lähes kartiomainen keila. Tätä tietoa hyödynnetään määrittäessä anturin

käyttöetäisyyttä, fokusoitua aluetta ja mittauskohteen optimaalista sijaintia (Krautkrämer & Krautkrämer, 1990).

## 2.12 Vaimeneminen, absorptio ja sironta

Kun ultraääniaalto etenee aineessa, sen energia vähenee etäisyyden kasvaessa. Tätä ilmiötä kutsutaan vaimenemiseksi, ja siihen vaikuttavat kaksi päämekanismia: absorptio ja sironta. Näiden yhteisvaikutus määrittää, kuinka pitkälle ja millä voimakkuudella ultraäänisignaali voi kulkea tutkittavassa materiaalissa.

Absorptio tarkoittaa sitä, että osa ääniaallon mekaanisesta energiasta muuttuu lämmöksi aineen molekyylien liikkeen seurauksena. Kun aineen osaset värähtelevät ultraääniaallon vaikutuksesta, niiden liike ei ole täysin elastista. Osa värähtelyenergiasta kuluu sisäisten rakenteiden, kuten atomihilojen ja molekyyliäidosten, relaksaatioprosesseihin. Tämä johtaa siihen, että äänen amplitudi pienenee etäisyyden kasvaessa, ja vaimennus kasvaa taajuuden noustessa. Monissa kiinteissä aineissa absorptio on suunnilleen verrannollinen taajuuteen, kun taas nesteissä ja kaasumaisissa aineissa se kasvaa usein taajuuden neliön suhteessa, näin matalataajuiset äänet kuuluvat kauemmaksi kuin korkeat.

Sironta puolestaan aiheutuu aineen rakenteellisista epähomogeenisuuksista, kuten rakeista, huokosista, epäpuhtauksista tai mikroskooppisista virheistä, jotka muuttavat ääniaallon kulkusuuntaa ja hajottavat energiaa eri suuntiin. Kun epähomogeenisuudet ovat pieniä verrattuna aallonpituuteen, esimerkiksi  $0,001 \dots 0,01\lambda$ , sironta on heikkoa ja aalto etenee lähes suoraviivaisesti. Jos rakeet tai huokoiset lähestyvät kooltaan samaa suuruusluokkaa kuin aallonpituus, esimerkiksi  $0,1\lambda$ , sironta kasvaa voimakkaasti ja aiheuttaa merkittävää vaimenemista. Tällöin äänienergia jakautuu laajalle alueelle ja vastaanotettu signaali heikkenee (Krautkrämer & Krautkrämer 1990).

Ultraääniaallon kokonaisvaimennus voidaan laskea matkan  $x$  eksponenttiyhtälönä:

$$A(x) = A_0 e^{-\alpha x}, \quad (19)$$

jossa  $A_0$  on alkuamplitudi ja  $\alpha$  vaimennuskerroin [Np/m]. Vaimennuskerroin sisältää sekä absorptio- että sirontavaikutuksen, ja sen arvo riippuu aineen koostumuksesta, rakenteesta, lämpötilasta ja signaalin taajuudesta. Usein vaimennusta esitetään desibeleinä yksikköä kohti muodossa

$$\text{Vaimennus (dB)} = 8.686 \alpha x. \quad (20)$$

Absorptio ja sironta eivät ole erillisiä ilmiöitä, vaan esiintyvät käytännössä samanaikaisesti. Esimerkiksi metalliseoksissa äänen kulkua rajoittaa sekä atomihilojen sisäinen kitka että rakeiden välinen rajapinta, joka hajottaa ääntä. Samoin jäässä sironta voi olla ratkaiseva tekijä, jos aine sisältää ilmakuplia, joiden koko on lähellä aallonpituutta.

Absorptio ja sironta määräävät, mitä taajuutta ja anturityyppiä on käytettävä, jotta ääni läpäisee tutkittavan aineen riittävällä voimakkuudella. Korkeataajuiset aallot tarjoavat paremman erotuskyvyn, mutta ne vaimenevat nopeammin, matalataajuiset aallot etenevät pidemmälle, mutta niiden erotuskyky on heikompi. Käytännön mittauksissa tämä kompromissi ratkaistaan aineen rakenteen ja mittaussyvyyden mukaan. Materiaalitutkimukseen on saatavilla eri taajuisia antureita, tarkoitettuna eri ainevahvuuksille ja eri koosten virheiden havaitsemiseen (Krautkrämer & Krautkrämer, 1990).

### 3 Ultraäänianturin rakenne ja toiminta

#### 3.1 Pietsosähköiset materiaalit

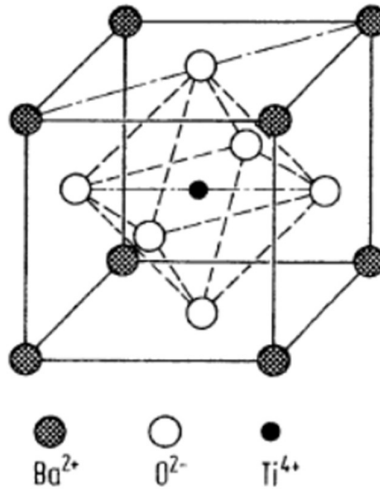
Ultraäänianturien toiminta perustuu edelleen pietsosähköiseen ilmiöön, jossa tietyt kiteiset materiaalit muuttavat sähköisen jännitteen mekaaniseksi muodonmuutokseksi ja vastaavasti mekaanisen jännityksen sähköiseksi varaukseksi. Tämä kaksisuuntainen muuntuminen tekee pietsosähkömateriaaleista käyttökelpoisia ultraäänianturissa, joissa sama elementti toimii sekä lähettimenä että vastaanottimena.

Pietsosähköinen käyttäytyminen liittyy kiderakenteen epäsymmetrisyyteen. Materiaalin yksikkökennoilla on pysyvä dipolimomentti, ja kun kide altistetaan mekaaniselle jännitykselle, ionit siirtyvät siten, että syntyy mitattava sähkövarauksen muutos. Vastaavasti sähköinen kenttä aiheuttaa kidehilan mekaanisen venymän tai puristuksen. Tätä ilmiötä kuvataan pietsosähkökertoimilla, joista tyypillisimpiä ovat *d*- ja *g*-kertoimet. Ne ilmaisevat, kuinka suuri mekaaninen siirtymä syntyy tietyllä sähkökentällä tai kuinka suuri sähkövaraus muodostuu tietyn mekaanisen jännityksen seurauksena.

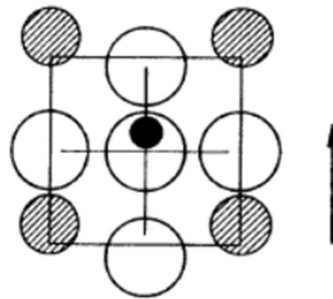
Pietsosähkömateriaalit voidaan jakaa kolmeen pääluokkaan: luonnollisiin kiteisiin, kuten kvartsiin; synteettisiin epäorgaanisiin keraameihin, kuten lyijyzirkonaattititanaattiin (PZT); sekä polymeeripohjaisiin materiaaleihin, kuten polyvinylideenifluoridiin (PVDF). Kvartsilla on erinomainen lämpöstabiilisuus ja pieni häviö, mutta sen pietsosähköinen vaste on suhteellisen heikko. PZT-keraamit tarjoavat suuren muuntotehokkuuden ja säädettävät dielektriset ominaisuudet, minkä vuoksi ne ovat yleisin valinta ultraääniantureissa. PVDF ja muut polymeerit ovat joustavia ja soveltuvat erikoisrakenteisiin antureihin.

Kiteiset ja keraamiset materiaalit eivät kuitenkaan tuota pietsosähköilmiötä luonnostaan yhtä voimakkaasti. Esimerkiksi PZT vaatii polarisointiprosessin, jossa materiaali altistetaan voimakkaalle sähkökentälle lämpötilassa, joka on vähän alle Curie lämpötilan. Tämä

prosessi järjestää dipolit tiettyyn suuntaan. Polarisaation suunta määrää anturin toimintasuunnan ja sen, miten mekaaninen liike kytkeytyy sähköiseen signaaliin.



**Kuva 9.** Bariumtitanaatin kiderakenteen kolmiulotteinen havainnekuva. (Krautkrämer & Krautkrämer, 1990).



**Kuva 10.** Bariumtitanaatin kiderakenteen kaksiulotteinen havainnekuva polarisaatiosta. (Krautkrämer & Krautkrämer, 1990).

Pietsosähköisten materiaalien käyttäytymistä kuvataan lisäksi niiden mekaanisilla ja sähköisillä häviöillä, dielektrisellä permittiivisyydellä ja akustisella impedanssilla. Nämä ominaisuudet määräävät, kuinka hyvin materiaali kykenee tuottamaan lyhyitä pulssimaisia signaaleja, kuinka laajaksi anturin taajuuskaista muodostuu ja miten tehokkaasti se siir-

tää energiaa tutkittavaan aineeseen. Esimerkiksi suuri mekaaninen Q-arvo tuottaa kaapeakaistaisen resonanssin, kun taas voimakkaasti vaimennetut materiaalit sopivat laajakaistaisten impulssianturien valmistukseen (Krautkrämer & Krautkrämer, 1990).

### 3.2 Pietsosähköisen ilmiön laskenta

Ultraäänianturin toiminnassa keskeistä on pietsosähköisen materiaalin kyky muuntaa sähköistä energiaa mekaaniseksi venymäksi ja vastaavasti mekaanista jännitystä sähköiseksi varaukseksi. Tätä kaksisuuntaista ilmiötä kuvataan pietsosähköisen teorian perusyhtälöillä, jotka yhdistävät mekaniikan ja elektroniikan. Yhtälöissä yhdistyvät venymä  $s$ , mekaaninen jännitys  $\sigma$ , sähkökenttä  $E$  ja sähköinen siirtymä  $D$ :

$$s = s^E \sigma + dE, \quad (21)$$

$$D = d\sigma + \varepsilon^\sigma E, \quad (22)$$

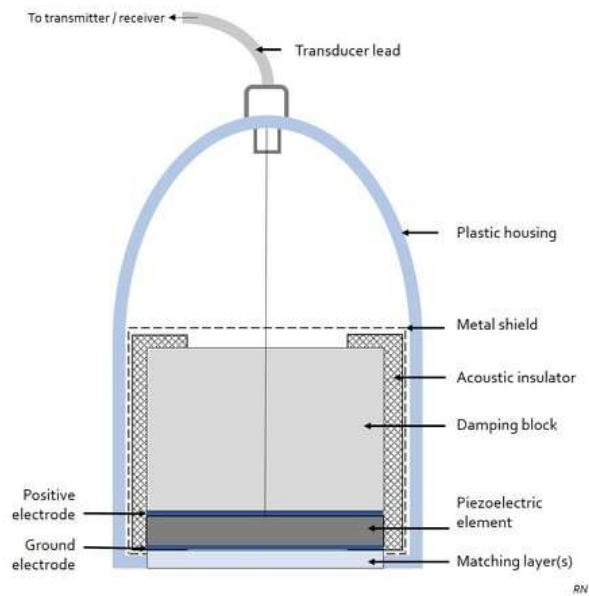
joissa kertoimet  $d$ ,  $s^E$  ja  $\varepsilon^\sigma$  määrittävät pietsokiteen käyttäytymisen. Pietsosähkökerron  $d$  kuvaa sähkökentän kykyä tuottaa mekaaninen venymä ja toisaalta mekaanisen jännityksen kykyä tuottaa sähköinen siirtymä. Kertoimet koostuvat useista eri vakioista, riippuen kyseessä olevasta materiaalista;  $s^E$  on elastisuuskerroin, johon voi vaikuttaa enimmillään 21 erilaista, toisistaan riippumatonta, komponenttia,  $\varepsilon^\sigma$  on dielektrisyyskerroin, johon voi vaikuttaa 6 komponenttia ja pietsosähkökertoimeen  $d$  voi vaikuttaa 18 komponenttia (IEEE. (1987). *ANSI/IEEE Std 176-1987: IEEE Standard on Piezoelectricity*).

Ensimmäinen yhtälö kertoo, että materiaaliin syntyvä venymä riippuu kahdesta tekijästä: elastisesta venymästä, joka määräytyy materiaalin mekaanisten ominaisuuksien mukaan, ja pietsosähköisestä venymästä, joka syntyy sähkökentän vaikutuksesta. Jälkimmäinen yhtälö kuvaa, kuinka materiaalin sisäinen sähköinen siirtymä koostuu sekä mekaanisen jännityksen aiheuttamasta varauksen muutoksesta että materiaalin dielektristen ominaisuuksien määräämästä kenttävastuksesta.

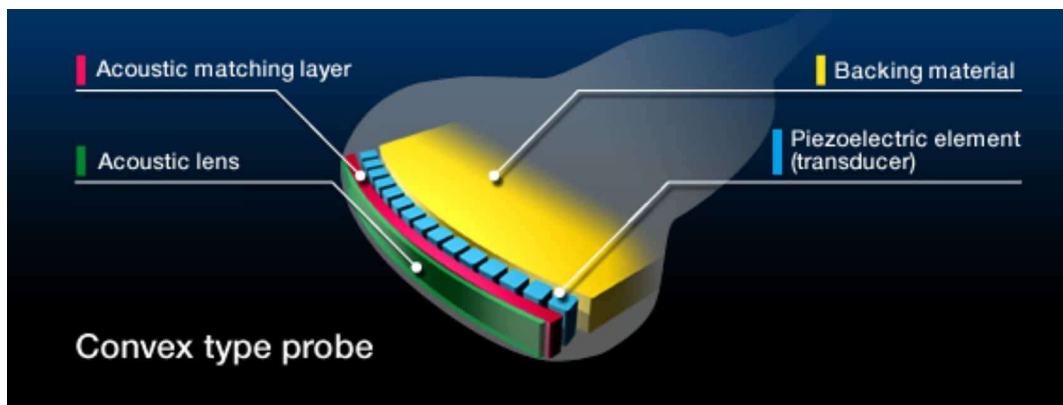
Kun ultraäänianturiin kytketään lyhyt jännitepulssi, sähkökenttä  $E$  saa pietsosähköisen levyn laajenemaan tai supistumaan. Tämä värähtely etenee tutkittavaan aineeseen ultraääniaaltona. Kun heijastunut aalto palaa takaisin anturiin, sen aiheuttama jännitys  $\sigma$  synnyttää materiaaliin sähköisen siirtymän  $D$ , josta muodostuu mitattava jännitesignaali. Samat yhtälöt kuvaavat siis sekä lähetys- että vastaanottoprosessia riippumatta siitä, kumpaan suuntaan energia muuntuu (IEEE. (1987). *ANSI/IEEE Std 176-1987: IEEE Standard on Piezoelectricity*).

### 3.3 Ultraäänianturin rakenne

Anturin ytimestä on pietsosähköinen elementti, jonka rakenne on polarisoitu siten, että se reagoi sähköisiin ja mekaanisiin muutoksiin. Anturin etupinnassa on akustinen sovituserros, joka välittää värähtelyn tutkittavaan aineeseen. Ilman tätä kerrosta suuri osa energiasta heijastuisi takaisin anturiin, sillä pietsosähkömateriaalin ja useimpien tutkittavien aineiden akustinen impedanssi poikkeaa suuresti toisistaan. Sovituserros pienentää tätä impedanssihyppyä ja parantaa signaalin etenemistä tutkittavaan aineeseen.



**Kuva 11.** Rakennekuva materiaalitarkastuksiin tarkoitettusta ultraäänianturista. (<https://radiopaedia.org/articles/ultrasound-transducer>).



**Kuva 12.** Rakennekuva sisäelinten tutkimukseen tarkoitettusta ultraäänianturista. (<https://www.probomedical.com/learn/blog/why-does-an-ultrasound-probe-need-matching-layers/>).

Akustista linssiä käytetään varsinkin sisäelinten tutkimukseen tarkoitetuissa antureissa. Se toimii kuten optinen linssi kokoamalla tai levittämällä signaalia. Kulutuspinna ja linssi

voidaan myös tarpeen mukaan yhdistää, niin että kulutuspinna toimii linssinä. Linssi ohjaa akustista signaalia haluttuun suuntaan, mutta ei vaikuta signaalin muodostukseen ja vastaanottoon (Krautkrämer & Krautkrämer, 1990).

Pietsokiteen taustapuolella on ns. "backing material" tai "damping block" eli taustaelementti, kuten kuvissa 11 ja 12 on esitetty. Taustaelementti osallistuu signaalin suuntaamiseen niin, että mahdollisimman paljon energiaa siirtyisi oikeaan suuntaan. Taustaelementillä on korkea impedanssi, ei kuitenkaan niin korkea kuin metalleilla. Materiaalina käytetään polymeerin tai komposiitin ja metallijauheen seosta (Krautkrämer & Krautkrämer, 1990).

## 4 Tutkimuksen toteutus

### 4.1 Käytössä oleva laitteisto

#### 4.1.1 Krautkramer USM 35

Materiaalitestaukseen ja hitsausaamojen tarkastukseen tarkoitettu ultraäänimittari löytyy kirjoittajan työpaikalta ja tulee olemaan pääasiallinen instrumentti mittauksissa.



**Kuva 13.** Materiaalitestaukseen tarkoitettu ultraäänilaite.  
(<https://www.ebay.com/itm/326630950799>)



**Kuva 14.** Materiaalitestaukseen tarkoitettu ultraäänianturi.

#### 4.1.2 Philips Ultrasound CX50

Paikallisen sairaalan lainaama, käytöstä poistettu, sisäelinten tutkimukseen tarkoitettu ultraäänilaite.

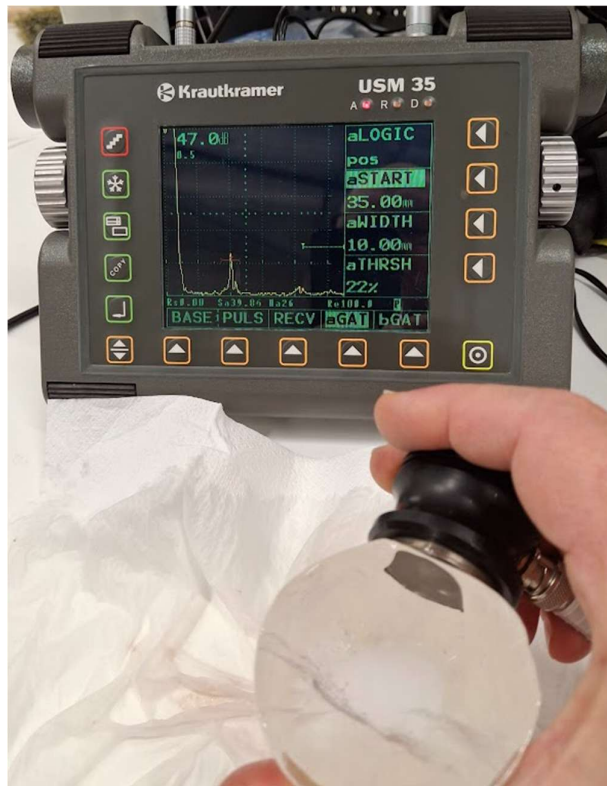


**Kuva 15.** Sisäelinten tutkimukseen tarkoitettu ultraäänilaite.

## 4.2 Alustava kokeilu

Koska jään ultraäänimittauksen onnistuminen on hyvin epävarmaa, eikä vastaavasta mittauksesta ollut tietoa kenttäolosuhteissa, suoritettiin joitakin alustavia kokeiluja materiaalintestauslaitteella ennen opinnäytetyön ja tutkimussuunnitelman aloittamista. Oli

tiedossa, että Satakunnan ammattikorkeakoulun omistaman ultraäänimittauslaitteen antureissa on jotain vikaa. Käytössä olevista antureista yksi toimi riittävällä luotettavuudella ja jään mittausta myös kokeiltiin pahvimukiin jäädytettyllä vedellä. Tulokset olivat alustavasti positiivisia ja loivat toivoa mittausten onnistumiselle.

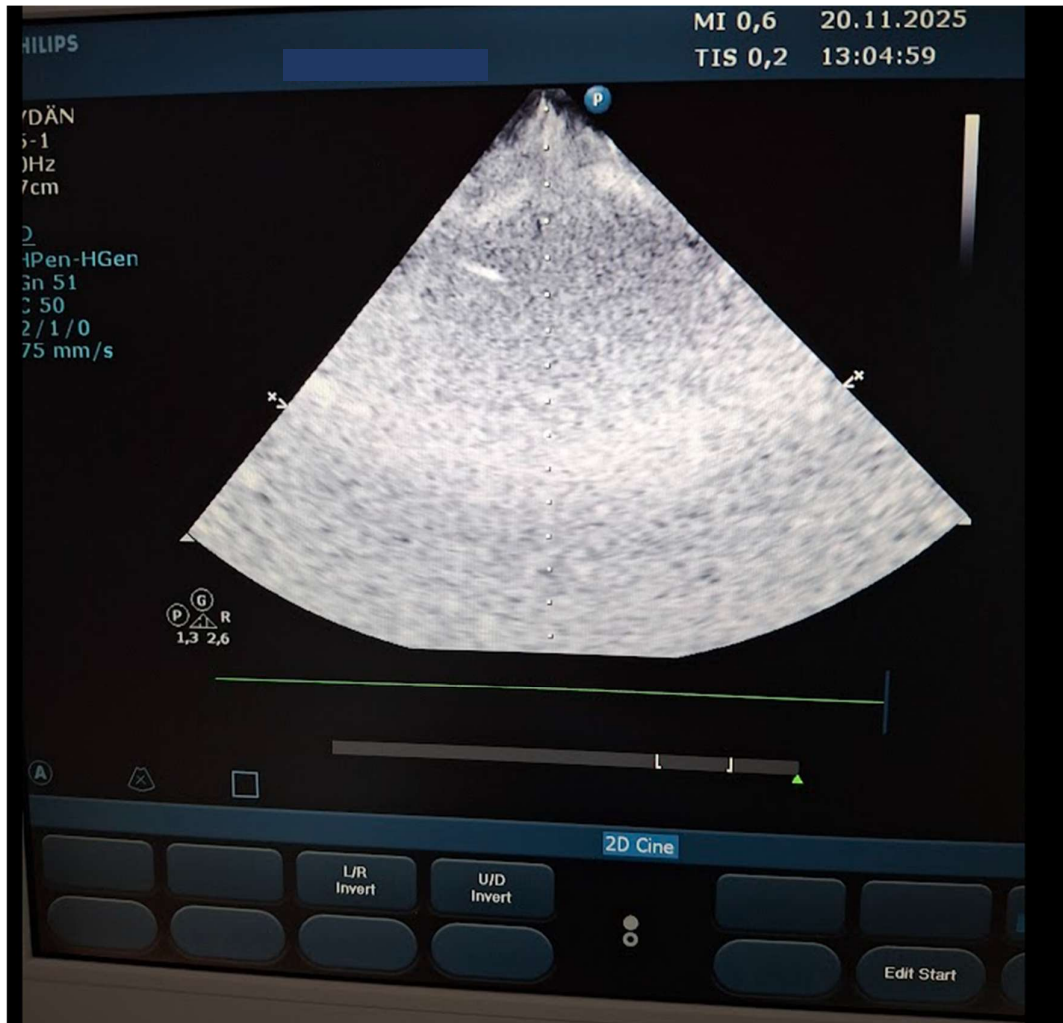


**Kuva 16.** Alustavaa kokeilua materiaalintestauslaitteella.

Alustavien kokeilujen perusteella kävi selväksi, että mittaukset eivät tule olemaan kovin tarkkoja; mittaustilanteessa on hyvin paljon virhelähteitä. Kontaktiaineena kokeiltiin metalleille tarkoitettua geeliä ja myös vettä. Vesi tuntui toimivan jäällä yhtä hyvin kuin geeli.

Lääketieteellisellä ultraäänitutkimuslaitteella tehty alustava kokeilu toi pettymyksen; jään vahvuutta ei pysty mittaamaan. Johtunee siitä, että laitteen näytön skaalaa ei pysty muuttamaan äänen nopeuden mukaan. Ihmisen pehmytkudosten tiheys on suurin piirtein samaa luokkaa kuin vedellä ja äänen nopeus pehmytkudoksissa on myös samaa luokkaa kuin vedessä (1500 m/s). Esimerkiksi rasvakudoksessa n. 1450 m/s ja lihaksessa

1540 m/s. (Radiopaedia.org. 2024). Koska äänen nopeus on jäässä yli kaksinkertainen, n. 3850 m/s, ei tutkimuslaitteen tarkkuus riitä osoittamaan rajapintaa jääkappaleen vastapuolella.



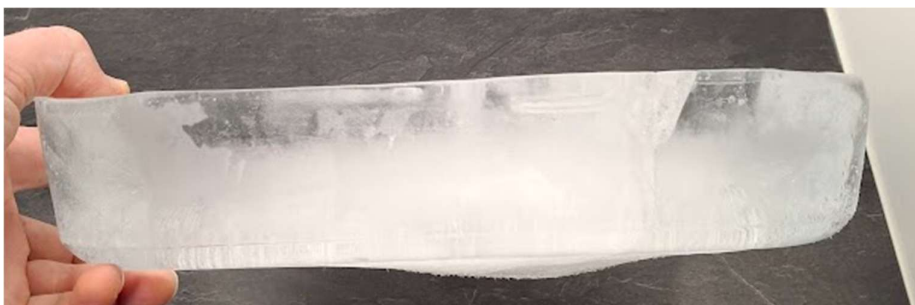
**Kuva 17.** Alustavaa kokeilua sisäelinten ultraäänitutkimuslaitteella.

On myös mahdollista, että antureiden käyttämä taajuus ei sovellu jäälle, ja signaali siroaa ja tuottaa kaikuaaltoja, jotka näkyvät kohinan täyttämänä kuvana

### 4.3 Virhelähteiden arviointi

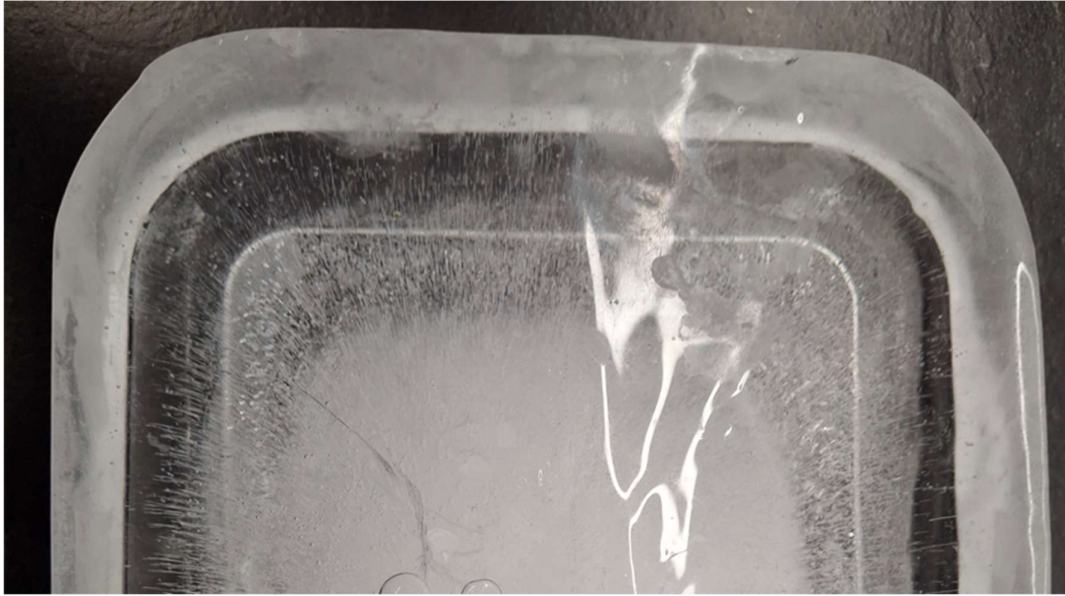
#### 4.3.1 Testikappaleiden virheet

Pahvimukiin ja muoviasiaan jäädytetyn testikappaleen vastakkaiset pinnat eivät ole mistään kohtaa samansuuntaiset eikä opinnäytetyön puitteissa ole mahdollisuuksia muotoilla jään pintaa tasaisemmaksi. Jäätyessään vesi laajenee ja koska jäätyminen tapahtuu ulkopinnoilta sisäänpäin, on muodonmuutos epätasaista. Laakeaan muoviasiaan jäädytetty kappale on keskeltä n. 20 mm paksumpi kuin reunoilta.



**Kuva 18.** Testikappaleen jäädytyksen aikana syntyneitä muodonmuutoksia.

Testikappaleen koostumuksessa on silmin havaittavaa eroa; ilmakuplat näyttävät tiivistyvän jäätyksen edetessä kohti kappaleen keskustaa; reunoilla jää on lähes virheettömän kirkasta, sisäosia kohti ilmakuplien määrä ja koko kasvaa, ja noin  $\frac{3}{4}$ -osaa kappaleesta on läpinäkymättömän, valkoisen kuplapilven täyttämä. On mahdollista, että ilmakuplat vaikeuttavat kappaleen vahvuuden mittausta, aiheuttavat mittausvirheitä ja voivat tehdä sen myös mahdottomaksi.



**Kuva 19.** Testikappaleen sisään jääneet ilmakuplat ja niiden alueellisuus.

Testikappaleen lämpötila vaikuttaa ääniaallon etenemisnopeuteen suhteella  $1-2\%/20^{\circ}\text{C}$  (Vogt ym. 2008). Mittausten suorittamiseksi testikappale on otettava pakastimesta huoneen lämpötilaan ja kappaleen lämpötila muuttuu testausten aikana. Lämpötilan muutoksen seurantaan on rajalliset mahdollisuudet, varsinkaan kappaleen sisäosien lämpötilaa on mahdoton arvioida tai mitata.

Testikappaleen pinta lämpenee ja pehmenee huoneen lämmössä. Alustavissa kokeiluissa on huomattu, että jään pinta pehmenee siinä määrin, että anturi painuu jäähän enintään n. 1 mm. Tämä tulee ottaa huomioon vertailumittausta suoritettaessa. Erityisesti pahvimukiin muodostunut jää on kooltaan niin pieni, että se alkaa sulaa mittauksen aikana. Tästä sulamisesta oli myös etua, koska anturin painuessa epätasaisuudet tasoittuivat, anturi koskee kappaleeseen suuremmalla pinta-alalla ja kaiku on selkeämpi. Kuvassa 15 näkyy anturin kosketuspinta kappaleen läpi.

### 4.3.2 Vertailumittauksen virheet

Johtuen pintojen epätasaisuuksista ja epäsuoruuksista, mekaanisen vertailumittauksen marginaaliksi arvioidaan  $\pm 2$  mm, työntömitalla suoritettuna. Mittatyökalun tarkkuus voidaan varmistaa laboratoriosta löytyvillä metallisilla kalibrointipaloilla.

### 4.3.3 Mittalaitteen ja anturin virheet

Koska ultraäänianturin koko on huomattavasti suurempi, kuin jään pinnan epätasaisuudet, tai ilmakuplat, on vahvuusmittauksen tulos keskimääräinen heijastuskeilan alueelta. Pienimmän ainevahvuuden mittausta vaatisi käytettäväksi anturia, jonka keila olisi mahdollisimman kapea juuri tutkittavalla ainevahvuudella ja kapeampi kuin epätasaisuudet.

Valmistaja ei anna virhemarginaalia laitteelle, vaan ainevahvuuden mittausta perustuu mittarin näytön asetukseen antureiden kalibroinnin yhteydessä. Mittausten luotettavuus on pitkälti kiinni operaattorin ammattitaidosta ja mittalaitteen asettelusta halutulle kohteelle optimaaliseksi. Mittauskohteen ja anturin mukaan suoritettavat alkusäädöt sisältävät seuraavat asiat: Näyttöalueen koko niin, että mitattava ainevahvuus mahtuu siihen, mitattavan materiaalin äänennopeus ja anturikohtaiset ja kontaktiaineen vaatima viive (D-Delay ja P-Delay), jotka asetetaan kalibrointimittauksen aikana, niin että mittaustulos vastaa kalibrointikappaleen oikeaa vahvuutta.

Ko. mittalaitteella voidaan näyttö asetella hyvin laajalle skaalalle äänennopeuden mukaan. Mikäli tarkastettavan aineen äänennopeutta ei tunneta, se voidaan mitata kalibrointikappaleella, joka on tehty kyseisestä aineesta. Krautkramer USM35:ssä on tähän tarkoitettu toiminto. Jään mittauksessa tarkkaa kalibrointikappaletta ei ole käytössä, joten mittalaitteen asetukset suoritetaan mahdollisimman tarkan mekaanisen mittauksen mukaan.

Mahdollisissa kenttäolosuhteissa ei alkukalibrointia voida tehdä mekaanisin mittauksin, koska menetelmän pitäisi olla ainetta rikkomaton, eikä jätää voi kuljettaa ja käsitellä ilman että sen muoto muuttuisi. Tällöin on luotettava testikappaleiden mittauksista saatuun kokemukseen äänennopeuden ja viiveen mukaan (<https://www.scribd.com/document/825041026/Usm-35-Operation-Manuals>).

#### 4.4 Testikappale



**Kuva 20.** Testikappale 1.



**Kuva 21.** Testikappale 1.

Testikappaleen ulkomitat ovat 274x208x70 mm. Koska jää alkaa huoneenlämmössä nopeasti sulaa, niin säilytysastiaan kertyy vettä, ja ohuen vesikerroksen todettiin vääristävän mittaustulosta. Astian ja testikappaleen alle asetettiin laudanpala, jotta testikappale nousi irti vedestä ja mittaaminen on siltä osin luotettavampaa.

## 5 Mittaukset

Mittaukset suoritettiin enimmäkseen yläpinnalta ja yhdeltä pitkältä sivulta ja yhdeltä lyhyeltä sivulta. Lopuksi testikappale laitettiin myös veteen ja muutama paksuusmittaus tehtiin niin. Vedessä kappale alkaa kuitenkin sulamaan erittäin nopeasti, eikä mittoja voi verrata aikaisempiin, kokonaan ilmassa tehtyihin mittauksiin. Harjoituksen vuoksi mitattiin myös veden syvyys jään läpi.

### 5.1 Mittalaitteen asetukset



Kuva 22. Mittalaitteen asetukset.

"P"- ja "D-Delay" asetuksia ei muutettu nollassa, koska jäätä tehtyä tarkkaa kalibrointikappaletta ei ollut käytettävissä. Näytön skaala, eli "Range", asetettiin odotetun tuloksen mukaisesti, leveyttä ja pituutta mitattaessa 400 mm:iin, ja paksuutta 100 mm:iin. Näytön

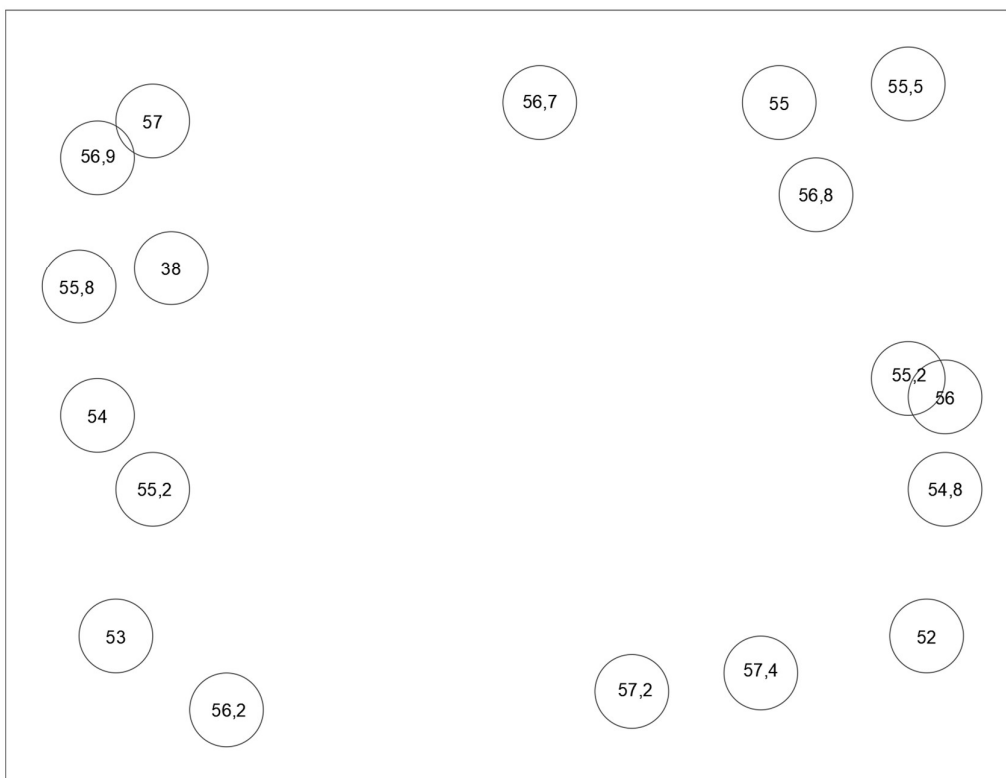
skaalan muuttaminen parantaa erotuskykyä tarkastellulla ainevahvuudella. Äänen nopeus asetettiin 3850 m/s ja pidettiin samana koko mittaustuokion aikana. Vahvistusta, eli "gain", muutettiin aina tarpeen mukaan signaalin erottumiseksi. Tulos näkyy alarivillä "Sa"-arvona, siltä alueelta, johon "a-gate" on asetettu. "Sa" ilmoittaa siis vahvimman signaalin antaman ainevahvuuden "a-gate":n sisältä. "a-gate" näkyy kuvassa 22 punaisena janana.

## 5.2 Mittaustulokset

Koordinaatiston origo on kaikissa mittauksissa kappaleen vasemmassa ylänurkassa vasemmankäden säännön mukaan, eli x kasvaa oikealle ja y alaspäin. Koordinaatit ovat millimetrejä. Mittaustulokset merkittiin vain silloin kun jokin tulos saatiin; suurelta osin jään vahvuutta ei kyetty mittamaan johtuen jään sisään muodostuneista ilmakuplista. Kahden suurimman läpimitan tulosta ei saatu useammasta kohtaa, johtuen myös kappaleen vinoista pinnoista.

**Taulukko 2.** Lyhimmän läpimitan mittaustulokset.

<b>X[mm]</b>	<b>Y[mm]</b>	<b>Ultraäänimittaus [mm]</b>	<b>Mekaaninen mit- taus [mm]</b>
40	30	57	54
145	25	56,7	57
210	25	55	54
245	20	55,5	52
25	40	56,9	55
45	70	38	57
220	50	56,8	NA
245	100	55,2	53
25	110	54	54
40	130	55,2	54
30	170	53	54
60	190	56,2	52,5
170	185	57,2	56
205	180	57,4	56
250	170	52	52
255	130	54,8	53
255	105	56	54
20	75	55,8	56



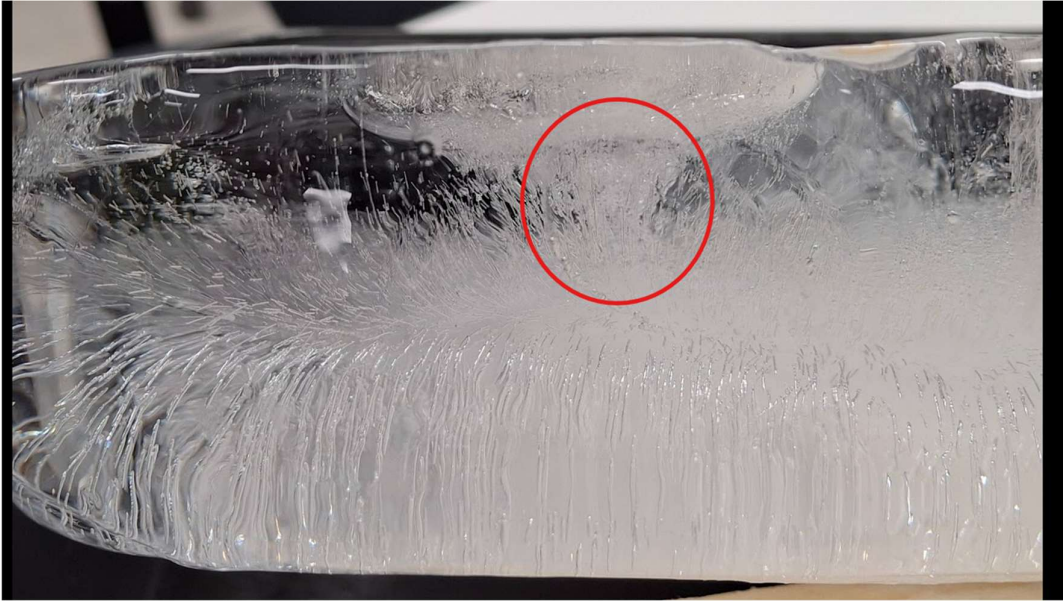
**Kuva 23.** Taulukon 2 mittauspisteet ja -tulokset piirretty geometrisesti oikeille paikoilleen.

**Taulukko 2.** Suurimman läpimitan mittaustulokset.

X [mm]	Y [mm]	Ultraäänimittaus [mm]	Mekaaninen mittaus [mm]
50	10	277,6	274
80	10	278,9	274

**Taulukko 3.** Testikappaleen leveyden mittaustulokset. Punaisella korostettu sisäisen virheen antama tulos.

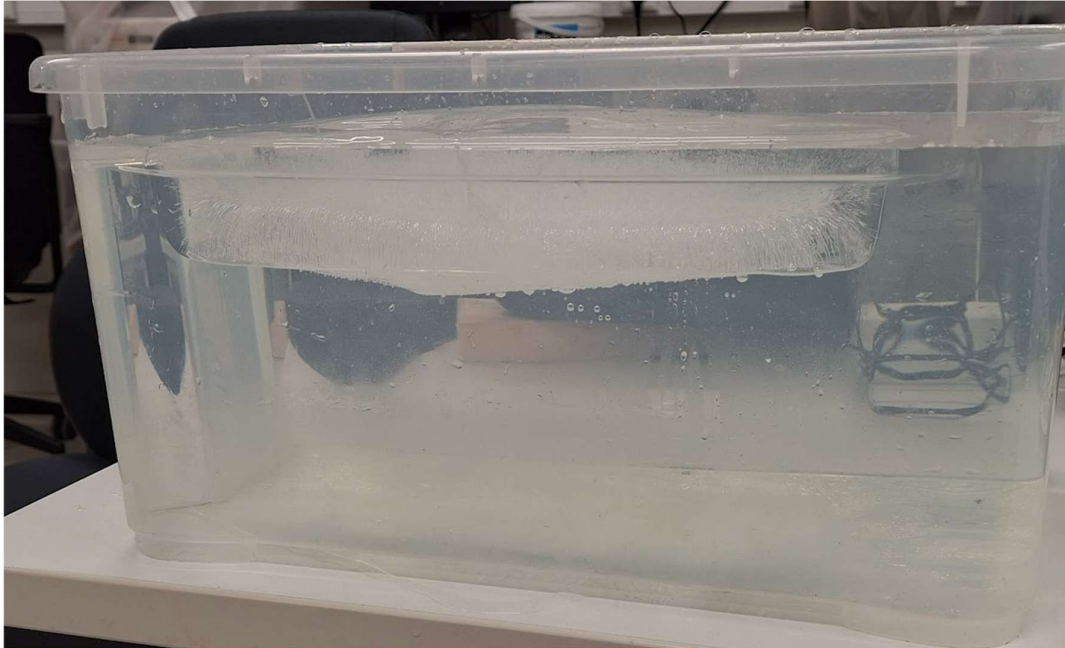
X [mm]	Y [mm]	Ultraäänimittaus [mm]	Mekaaninen mittaus [mm]
190	15	215,2	210
100	10	212	208
70	20	66	70



**Kuva 24.** Taulukossa 4 punaisella korostetun sisäisen virheen valokuva.

**Taulukko 4.** Testikappaleen lyhimmän leikkauksen mittaustulokset, vedessä kelluen.

X [mm]	Y [mm]	Ultraäänimittaus [mm]	Mekaaninen mittaus [mm]
250	60	43	43
235	170	46,5	42
140	180	48,7	49
30	170	40,7	40,5
20	42	42,3	42



**Kuva 25.** Testikappale asetettu veteen.

Vedessä tehtyä mittaussarjaa aloitettaessa oli näytön skaalaksi jäänyt 400 mm, jolloin havaittiin kaiku myös veden pohjasta. Tosin arvo oli 328 mm, vaikka veden todellinen syvyys oli n. 148 mm. Mittaheitto johtuu siitä, että mittalaitteeseen asetettu äänen nopeus oli 3850 m/s ja äänen nopeus vedessä on 1500 m/s. Näin laite laski signaalinkulke-  
man matkan huomattavasti liian suureksi. Kun sama mittaus tehtiin äänen nopeudella 1450 m/s, oli mittaustulos 126 mm. Tämä virhe johtuu siitä, että signaali kulki jääkerroksen läpi huomattavasti nopeammin ja laite laski signaalinkulke-  
man matkan vastaavasti lyhyemmäksi. Tasan 1500 m/s ei ollut mahdollista asettaa mittalaitteeseen.

Sattumalta syntynyt veden syvyyden mittaus osoittaa, että ultraäänianturilla on mahdollista mitata etäisyyksiä myös jään läpi, veden pohjaan tai ehkä myös alempiin jääkerroksiin. Tämä kuitenkin vaatii mittaustuloksen muuttamisen matemaattisesti. Seuraavat kaavat ovat johdettu vesikerroksen oikean vahvuuden laskemiseksi:

$$t_k = \frac{s_k}{1000 \cdot v_1}, \quad (23)$$

jossa  $t_k$  on signaalin kulkemiseen kulunut kokonaisaika,  $s_k$  laitteen ilmoittama kokonais-  
ainevahvuus millimetreinä ja  $v_1$  äänen nopeus aineessa 1 [m/s].

$$t_1 = \frac{s_1}{1000 \cdot v_1}, \quad (24)$$

jossa  $t_1$  on signaalin aineessa 1 kulkema aika [m/s] ja  $s_1$  on laitteella mitattu aineen 1  
vahvuus [m/s].

$$t_2 = t_k - t_1 \quad (25)$$

jossa  $t_2$  on signaalin aineessa 2 kulkema aika.

$$s_2 = t_2 \cdot v_2 \quad (26)$$

jossa  $s_2$  on aineen 2 oikea vahvuus ja  $v_2$  äänen nopeus aineessa 2 [m/s]. Kaavat 23–26  
sievenevät yhdistettynä muotoon:

$$s_2 = \frac{(s_k - s_1) \cdot v_2}{v_1} \quad (27)$$

Mikäli vesikerroksen alla olisi vielä jäätä, sen vahvuuden voisi laskea suoraviivaisesti  
heijasteiden etäisyyksien erotuksesta.

### 5.3 Tulosten arviointi

Ultraäänimittauksessa on aina suuri mahdollisuus virheisiin, väärin käytettynä laitteen  
saa näyttämään juuri sen mitä halutaan. Yleensä ultraäänitutkimusta käytetään materi-  
aalin sisäisten virheiden etsintään, jolloin operaattori niitä havaitessaan keskittyy virhei-  
den korostamiseen. Tässä tutkimuksessa keskityttiin ainevahvuuden mittaamiseen, jol-  
loin sisäiset virheet jätettiin pääasiassa huomiotta. Ilmakuuplia oli jään sisällä siinä määrin,  
että mittaus oli mahdotonta suurimmalta osalta testikappaletta. Kuplien koko oli ilmei-  
sesti niin pieni, että ne eivät antaneet heijastetta. Korkeampitaajuisella anturilla mitat-  
taessa kuplat olisivat saattaneet näkyä heijasteina.

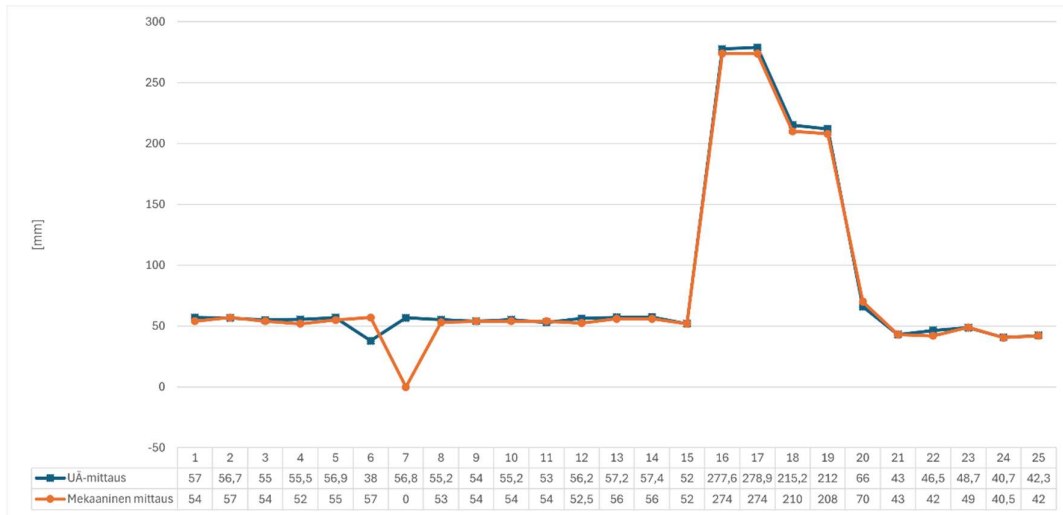
Koska mittalaitteeseen ei tehty kunnollista kalibrointia, on mittaustuloksia arvioitava kriittisesti ja asetettava jonkinlainen virhemarginaali, esimerkiksi  $\pm 1 \text{ mm}$ . Mittausten kokonaisvirhe lasketaan kaavalla:

$$\Delta s = \sqrt{\Delta s_u^2 + \Delta s_m^2}, \quad (28)$$

jossa  $\Delta s_u$  on ultraäänimittauksen virhe ja  $\Delta s_m$  on mekaanisen mittauksen virhe. Taulukoon 5 on laskettu mittausten erotus virheineen.

Taulukko 5. Mittausten erotus ja virhe.

Ultraäänimittaus [mm]	Mekaaninen mittaus [mm]	Erotus ja virhe [mm]
57	54	$3 \pm 2,2$
56,7	57	$-0,3 \pm 2,2$
55	54	$1 \pm 2,2$
55,5	52	$2,5 \pm 2,2$
56,9	55	$1,9 \pm 2,2$
38	57	$-19 \pm 2,2$
56,8	NA	
55,2	53	$2,2 \pm 2,2$
54	54	$0 \pm 2,2$
55,2	54	$1,2 \pm 2,2$
53	54	$-1 \pm 2,2$
56,2	52,5	$3,7 \pm 2,2$
57,2	56	$1,2 \pm 2,2$
57,4	56	$1,4 \pm 2,2$
52	52	$0 \pm 2,2$
277,6	274	$3,6 \pm 2,2$
278,9	274	$4,9 \pm 2,2$
215,2	210	$5,2 \pm 2,2$
212	208	$4 \pm 2,2$
66	70	$-4 \pm 2,2$
43	43	$0 \pm 2,2$
46,5	42	$4,5 \pm 2,2$
48,7	49	$-0,3 \pm 2,2$
40,7	40,5	$0,2 \pm 2,2$
42,3	42	$0,3 \pm 2,2$



**Kuva 26.** Taulukon 5 arvot graafisena kuvaajana.

## 6 Yhteenveto

### 6.1 Aiheen valinta

Idea jään mittaukseen ultraäänellä on syntynyt jossain vaiheessa talvella 2024–25. Aiheen henkilökohtaiseen kiinnostavuuteen on vaikuttanut harrastukset liittyen merellä liikkumiseen ja kesämökin sijainti saarella, sekä kokemus ultraäänianturin käyttämisestä hitsaustarkastajan kurssilla. Aiheen valintaan opinnäytetyöksi on vaikuttanut tosiseikat, että vastaavaa jään mittausta ei nettihauulla ole löytynyt. Myöskään kaupallisia laitteita ei ole saatavissa erityisesti jään mittausta varten. Facebook-sivustolta löytyi Winnipeg-järvelle tehdyn jäätien vahvuuden mittauspäivitys, mutta tarkempaa tietoa käytetystä laitteistosta ei ilmoitettu. Aiheesta kiinnostuneena otettiin yhteyttä myös Ilmatieteen laitokseen. Yhteydenotto vahvisti, että ainakaan Pohjois-Euroopassa ei ole ympäristöntutkimuskäytössä, jään pinnalta tehtävää, ultraäänitekniikkaan perustuvaa jään mittausta.

Ilmatieteenlaitoksen jäänmittauslaitteet ovat pääasiassa kahdenlaisia: (1) Meren pohjaan jätetty laitteisto, joka mittaa jään alapinnan etäisyyttä pohjasta kaikuluotaimella. Tuloksiin päästään käsiksi jäiden lähdettyä, niitä verrataan vedenpinnan korkeuksiin ja lasketaan jääkerroksen vahvuus ja sen muutos ajan funktiona. (2) Pintaan jäätymään jätettävä laitteisto, joka tunnistaa mikä osa laitteesta on vedessä, jäässä ja ilmassa lämpöantureihin perustuen. Ilmatieteenlaitos kyllä käyttää kansainvälisten yhteistyösatelliittien tuottamaa jäänvahvuusmittauksia ja laivojen tuottamaa jäänvahvuusmittaustuloksia.

### 6.2 Kirjallisuuskatsaus

Kirjallisuuskatsaus perustuu ultraäänitekniikan osalta pääasiassa yhden teoksen sisältöön. Krautkrämereiden julkaisema ”Ultrasonic testing of materials” on erittäin laaja ja perusteellinen, yli 600-sivuinen teos, ikään kuin ultraäänitarkastusten ensyklopedia, peruskäsikirja, josta löytyy kaikki tässä työssä tarvittava tieto ultraäänitarkastusten teori-

asta ja käytännöstä. Suurimmaksi osaksi yhteen lähteeseen tukeutuminen tietenkin kaventaa näkökulmaa, mutta jonkin verran tukea on haettu muistakin lähteistä, joista jokin on myös lähteinä Krautkrämereiden teoksessa. Jään mittauksen käytössä olevat ja ajantasaiset metodit on haettu asiaa käsittelevistä tutkimusjulkaisuista.

### **6.3 Tietopohja**

Kiinteiden aineiden akustiikka on valtavan monimutkaista ja sisältää uskomattomat määrät yhtälöitä ja teorioita. Opinnäytetyön puitteissa tietopohjan rakentamisessa on keskitytty perusteisiin ja helposti käsitteelistettäviin yhtälöihin, jotka myös tukevat ilmiöiden ymmärtämistä ja mittaustapahtuman tulkintaa. Aiemmat opinnot liittyen konetekniikan insinööritutkintoon antaa osaltaan pohjaa elastisuusteorian soveltamisessa akustiikkaan. Ultraäänitarkastusta on myös harjoiteltu kansainvälisen hitsaustarkastajan (IWI) opinnoissa.

### **6.4 Tulokset**

#### **6.4.1 Käytetyt mittalaitteistot ja niiden soveltuvuus**

##### **6.4.1.1 Krautkramer USM 35 ja Philips Ultrasound CX50**

Mittaus onnistui metalliteollisuuteen tarkoitetulla materiaalintarkastuslaitteistolla Krautkramer USM 35. Jään vahvuuden mittaus ei onnistunut sisäelinten lääketieteelliseen tutkimukseen tarkoitetulla laitteistolla Philips Ultrasound CX50.

Mittauksen onnistuminen kohtuullisella virhemarginaalilla on yllättävän hyvä tulos itsessään. Monin paikoin ultraäänimittaus oli tarkempi kuin mekaaninen mittaus virheineen. Tämä osoittaa, että kiinteiden aineiden tarkastukseen tarkoitetulla mittalaitteistolla voi mitata myös jään kerrosvahvuutta. Mittalaite on myös liikuteltava sisään asennettavien paristojen ansiosta.

### 6.4.2 Mittaustarkkuus

Mittaustulokset ovat jopa tarkempia kuin mekaanisen referenssimittauksen tarkkuus. Mikäli sopiva kalibrointikappale valmistettaisiin, olisi jopa  $\pm 0,1$  mm tarkkuus mahdollista saavuttaa. Ilman kalibrointia tarkkuus on arviolta luokkaa  $\pm 1$  mm. Tarkkuus epäilemättä kärsii suuremmilla vahvuuksilla, varsinkin kun suurempaa vahvuutta vastaavaa kalibrointikappaletta ei ole käytössä.

Mittauksen virhemarginaali ei estä mittauksen käyttöä luonnon jäällä. Ilmatieteenlaitoksen ohjeet jäällä liikkumisen turvallisuudesta ovat pyöristettyjä lähimpään viiteen senttimetriin, joten arvioitu ultraäänimittauksen tarkkuus riittää hyvin vastaavaan kohteeseen (<https://www.ilmatieteenlaitos.fi/ajoneuvolla-jaalle>). Verratessa SAR ja EM -mittauksiin, voi sanoa ultraäänimittauksen vähintäänkin puoltavan paikkaansa, mitä tulee tarkkuuteen. (Ronkainen et al. 2018; Haas 2016; Karvonen & Cheng 2024).

### 6.4.3 Tarkkuuteen vaikuttavat tekijät

Pinnan karheus ja epätasaisuus vaikeuttavat ultraäänimittausta, jos anturin ja jään pintaan ei synny riittävän laajaa kosketuspintaa. Tämän takia kosketuspinnan voi kastella nestemäisellä vedellä ja varmistaa että anturin pinta on yli  $0^{\circ}\text{C}$ , jotta väliaineena käytettävä vesi pysyy nestemäisenä eikä jään ja anturin väliin pääse ilmaa. Mikäli anturi on riittävän lämmin sulattamaan jään pinnan epätasaisuudet, syntyy laaja kosketuspinta lähes koko anturin pinta-alalle ja mittaaminen onnistuu helposti ilman lisättävää väliainetta.

Anturin pinta-alan koko vaikuttaa siihen minkä kokoiselta alueelta signaali heijastuu takaisin, jään vahvuus on keskiarvo anturin pinta-alaa vastaavalta alueelta. Mitä pienempi anturi, sitä tarkempi. Toisaalta pienemmän anturin lähettämä signaali siroaa helpommin. Anturin taajuus vaikuttaa mittauksen onnistumiseen; matalataajuinen signaali heijastuu rajapinnoilta helpommin, mutta saattaa myös jäädä helpommin poukkoilemaan materiaalin sisään ja vääristää tuloksia. Tutkimuksessa käytetty 2,25 MHz anturi toimi varsin

optimaalisesti käytetyillä ainevahvuuksilla (40-280 mm). Korkeampitaajuisella anturilla olisi mahdollista havaita pienempiä ilmakuplia tai muita virheitä jään sisällä, jos se olisi tarpeen.

Mittaus ei onnistu kaikenlaiselle jäälle, esimerkiksi jäätynyt loska todennäköisesti sisältää liikaa ilmakuplia, ja signaalin siroaminen estää mittauksen. Luonnossa esiintyy kaikenlaista jäätä ja ainakin kirkkaalle jäälle mittaus onnistuu. Mitattaessa on testikappaleestakin haettava kohtaa, josta mittaus onnistuu. Samoin on tehtävä luonnon jäätä tutkittaessa.

Luonnonjäen muodostuminen kirkkaaksi tai sameaksi on hyvin paljolti kiinni olosuhteista. Kirkkaan jäen esiintyminen luonnossa on hyvinkin tavallista alkutalvesta, ensimmäisten kovien pakkasöiden jälkeen, sillä kirkas jää muodostuu veden ja ilman rajapintaan ja jäätyminen etenee alaspäin muodostaen lähes yksikiteisen jääpeitteen. Kirkkaan jäen muodostumista häiritsee lumi- ja vesisade ja aallot, jotka rikkovat ensimmäiset ohuet jääkerrokset. On kuitenkin varsin tavanomaista, että kovina pakkasöinä ei tuule eikä sada. Siten kirkasta luonnonjäättä on mahdollista löytää mistä tahansa vesistöistä jossain kohtaa talvea. (Leppäranta, 2011).

## **6.5 Sovellukset ja mahdollisuudet**

### **6.5.1 Käyttö referenssinä**

Johtuen ultraäänimittauksen erinomaisesta tarkkuudesta ja jopa useiden metrien läpäisykyvystä, voisi metodia käyttää muiden mittalaitteiden kalibrointiin ja referointiin, ainakin kirkkaalle jäälle. Kirkkaan merijään mekaaninen mittaus muuttuu erittäin hankalaksi ja aikaa vieväksi, kun jäen vahvuus on yli metri. Ohuemman kirkkaan jäen vahvuuden mittaus on ultraäänellä myös tarkempaa ja nopeampaa kuin mekaanisella mitalla mitattuna.

### 6.5.2 Paikallisuus

Jääteiden, virtauskohtien, väylien tai muiden tarkasti määritellyiden kohteiden mittaaminen on helpompaa ja tarkempaa kuin muilla esitellyillä tavoilla. Esimerkiksi jääteitä ei välttämättä haluta puhkoa mekaanisella mittauksella. Myöskään matalien vesistöjen mittaamiseen ei taida olla tämän parempaa, liikuteltavampaa ja nopeampaa tapaa, mikäli jää vain on kirkasta.

### 6.5.3 Liikuteltavuus

Ultraäänilaitteiston kuljetuslaatikko painaa noin 10 kg, mutta itse laitteisto vain noin pari kilogrammaa. Laitteiston mukaan ottaminen jäätutkimukseen ei ole logistinen tai kustannusongelma, sillä laitteistoja on saatavissa n. 500 €:n hintaan.

### 6.5.4 Automatisointi

Mobiilirobottiin asentaminen on myös mahdollista, mutta vaatii mittalaitteiston etäkäyttöä tai robotisointia. NDT-tarkastuksissa anturilla on haettava kohtaa, josta kaiku saadaan, eikä ole kovin helposti automatisoitavissa. Aihetta on kuitenkin paljon tutkittu tuotantoon integroitavan tarkastusjärjestelmän kannalta (Kovarikova et al. 2025; Zhang et al., 2023). Sekä mittausdatan käsittelyn kannalta (Fuentes et al., 2020; Sun et al., 2023). Luonnonjään mittaus on kuitenkin hyvin paljon epämääräisempää kuin sarjatuotteina valmistettavien metallituotteiden, joiden yleensä on tarkoitus olla mitoiltaan mahdollisimman paljon toistensa kaltaisia. Robotisointia kuitenkin puoltaa mahdollisuus jäällä liikkumisen vaarallisuudesta ja mahdollisuus tutkia suuria alueita nopeasti ja automaattisesti ja ehkä myös jatkuvalla valvonnalla.

## Lähteet

- Ronkainen, I., Haapala, J., Lensu, M., Karvonen, J., & others. (2018). *Interannual sea ice thickness variability in the Bay of Bothnia*. *The Cryosphere*, 12, 3459–3476.
- Ward, S. H., and Hohmann. G.W., (1988). *Electromagnetic methods in applied geophysics-theory, volume 1*, SEG Monograph, (M.N. Nabighian, Ed.), Vol. 3.
- Haas, C. (2006). Airborne electromagnetic sea ice thickness sounding in shallow, brackish water environments of the Caspian and Baltic Seas, Proceedings of OMAE2006 25th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 4–9 June 2006, Hamburg, Germany, 6 pp., 2006.
- Haas, C., (1998). Evaluation of ship-based electromagnetic-inductive thickness measurements of summer sea-ice in the Bellingshausen and Amundsen Seas, Antarctica, Cold Regions Science and Technology.
- Kovacs, A., and Holladay, J. S., (1990). Sea-ice thickness measurements using a small airborne electromagnetic sounding system, *Geophysics*.
- Karvonen JA, Cheng B (2024). Baltic sea ice thickness estimation based on X-band SAR data and background information. *Annals of Glaciology* 1–11. <https://doi.org/10.1017/aog.2024.24>
- De Carolis G, Olla P and De Santi F (2021). SAR image wave spectra to retrieve the thickness of grease-pancake sea ice using viscous wave propagation models. *Scientific Reports* 11, 2733. doi: 10.1038/s41598-021-82228-x.
- Benson, D. (2007). *Music: A Mathematical Offering*. Cambridge University Press.

Bacon, F. (1627). *Sylva Sylvarum: Or, A Natural History*. London: J. Haviland. <https://archive.org/download/sylvasylvarumorn00baco/sylvasylvarumorn00baco.pdf>

Hooke, R. (1665). *Micrographia*. London: The Royal Society.

Sokolov, S. Y. (1929). The use of ultrasonic vibrations for flaw detection.

Krautkrämer, J., & Krautkrämer, H. (1990). *Ultrasonic Testing of Materials* (5th ed.). Springer-Verlag. <https://ebookcentral-proquest-com.proxy.uwasa.fi/lib/tritonia-ebooks/reader.action?docID=3099756&ppg=73&c=UERG>

Curie, P., Curie, J. (1880). On the development, by pressure, of polar electricity in hemihedral crystals with inclined faces. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 91, 294–295. (Translated abstract available in *Annales de Chimie et de Physique*, 1881.)

Langevin, P. (1918). The Production and Use of Ultrasonic Waves. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 166, 53–56.

Firestone, F. A. (1945). Supersonic Reflectoscope. *Journal of the Acoustical Society of America*, 17(3), 287–290. <https://doi.org/10.1121/1.1916304>

Donald, I., MacVicar, J., & Brown, T. G. (1958). Investigation of Abdominal Masses by Pulsed Ultrasound. *The Lancet*, 271(7032), 1188–1195.

Landau, L. D., & Lifshitz, E. M. (1986). *Theory of Elasticity* (3rd ed.). Pergamon Press.

Kinsler, L. E., Frey, A. R., Coppens, A. B., & Sanders, J. V. (2000). *Fundamentals of Acoustics* (4th ed.). Wiley.

Huygens, C. (1912). *Treatise on Light* (S. P. Thompson, Trans.). Macmillan. (Original work published 1690)

Vogt, C., Laihem, K., & Wiebusch, C. (2008). Speed of sound in bubble-free ice. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 124(1), 310–318. <https://doi.org/10.1121/1.2932080>

Smith, L.L., & Kishoni, D. (1987). Measurement of the speed of sound in ice. NASA Technical Reports. <https://ntrs.nasa.gov/citations/19870031676>

IEEE Standard on Piezoelectricity (ANSI/IEEE Std 176-1987). IEEE.

Radiopaedia.org. (2024). Propagation speed. <https://radiopaedia.org/articles/propagation-speed>

<https://www.scribd.com/document/825041026/Usm-35-Operation-Manuals>

Leppäranta, M. (2011). *The Drift of Sea Ice / Sea Ice Physics*. Springer.

<https://www.ilmatieteenlaitos.fi/ajoneuvolla-jaalle>

Kovarikova, Z., Duchon, F., Porubsky, M., et al. (2025). Robotic Ultrasound Diagnostic System for Non-Destructive Testing in Highly Variable Production. *Electronics*.

Zhang, M., Sutcliffe, M., Carswell, D., & Yang, Q. (2023). Robotic path planning using NDT ultrasonic data for autonomous inspection. *International Journal of Metrology and Quality Engineering*.

Fuentes, R. et al. (2020). Autonomous ultrasonic inspection using Bayesian optimisation. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*.

Sun, H., Jacob, R., et al. (2023). Machine learning for ultrasonic nondestructive examination of welding defects: A systematic review. *Ultrasonics*.