

Ainettarikkoman ultraäänitarkastus Johdatus perusteisiin

Ainettarikkomaton ultraäänitarkastus

Johdatus perusteisiin

Michael Berke

Sisältö

Johdanto	4
1. Miksi ultraääntä ainettarikkomat-tomaan tarkastukseen	4
2. Ultraäänitarkastuksen tehtävät	5
3. Epäjatkuvuuksien havaitseminen	5
4. Tarkastusmenetelmät ja laitetekniikka	9
4.1 Ultraäänilaite	9
4.2 Lähierotuskyky	13
4.3 Luotain	14
4.4 Taittuminen ja aaltomuodonmuutos	15
4.5 Kulmaluotaimen ominaisuudet	18
4.6 Kaksoisnormaaliluotain	19
5. Epäjatkuvuuksien paikantaminen	20
5.1 Ultraäänilaitteen säätö	20
5.1.1 Säätö normaaliluotaimella	21
5.1.2 Säätö kaksoisnormaaliluotaimella	23
5.1.3 Säätö kulmaluotaimella	24
5.1.4 Paikantaminen kulmaluotaimella	26
6. Epäjatkuvuuksien arvostelu	27
6.1 Koon määrittäminen äänikeilan reunan avulla	27
6.2 Pienten epäjatkuvuuksien koon arviointi: AVG-menetelmä	29
6.3 Vaimennus	32
6.4 Vertailukappalemenetelmä	32
6.4.1 Kaikukorkeusvertailu	32
6.4.2 Etäisyys-amplitudi-käyrä (DAC)	33
7. Dokumentointi	35
8. Näyttämien tulkinta	36

Käännös Sonar Oy

Johdanto

Ultraäänitarkastusta on käytetty jo 40 vuotta. Ensimmäisistä kokeiluista löytää materiaalivikoja ultraäänen avulla on kehittynyt klassinen tarkastusmenetelmä. Nykyaikaiselta tarkastukselta vaaditaan **toistettavia tuloksia**. Ne on voitu saavuttaa laitetekniikan voimakkaan kehityksen ansiosta. Tämä asettaa vaatimuksia tarkastuksen rajoitusten tuntemukseen ja oikean tarkastus-tekniikan soveltamiseen. Aina eivät kuitenkaan kaikki vaikutukset ole niin merkittäviä, että ne olisi otettava huomioon. Useissa tapauksissa voidaan jokin vaikutus jättää huomioimatta ilman, että mittaustulokset vääristyisivät. Tällä tavoin tarkastus yksinkertaistuu ja tarkastusaika lyhenee. Kuitenkin vain vastuuntuntoisesti tehtävänsä suorittavilla ja itsensä uusimman tekniikan tasolla pitävillä tarkastajilla on tulevaisuus.

1. Miksi ultraääntä ainettarikkomattomaan tarkastukseen

Pintatarkastukseen tarkoitettujen tunkeumaneste- ja magneettijauhetaikastusten lisäksi käytettiin radiografia tarkastusta sisäisten vikojen havaitsemiseksi 50 - luvun alussa. Toisen maailman-sodan jälkeen alkoi ultraäänilaitteiden valmistus.

Ultraäänitarkastus perustuu kiinteiden materiaalien hyvään äänenjohtamiskykyyn. Rajapintojen lisäksi myös sisäiset viat (säröt, sulkeumat jne.) heijastavat hyvin ääntä. Materiaalin vaikutus ääneen on sitä merkittävämpi mitä pienempi aallonpituus on eli mitä korkeampi taajuus on:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

c = äänennopeus

f = taajuus

λ = aallonpituus

Jotta aallonpituus olisi mm-alueella, on ultraäänen taajuuden oltava 0,5 - 25 MHz. Matalammilla taajuuksilla on vikojen vaikutus ultraääniaaltoihin niin pieni, että niiden havaitseminen tulee jo kyseenalaiseksi.

Ultraääni- että radiograafinen tarkastus, jotka osittain korvaavat ja täydentävät toisiaan, ovat tällä hetkellä tärkeimmät sisäisten vikojen tarkastukseen käytettävät menetelmät. Edullisella ja vaarattomalla ultraäänitarkastuksella voidaan ratkaista monia tarkastustehtäviä, kun erityistarkastuksiin käytetään kuten ennenkin radiografiaa. Suurta varmuutta vaativissa kohteissa (ydinvoimalat, lentokoneenrakennus jne.) käytetään molempia menetelmiä.

2. Ultraäänitarkastuksen tehtävät

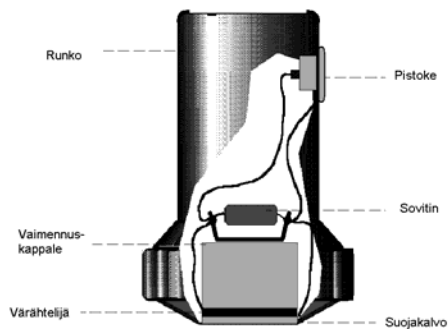
Onko ultraäänitarkastuksessa tiettyä tehtävien suoritusjärjestystä? Jos rajoitetaan pelkästään merkittäviin materiaalivikoihin, saadaan seuraava järjestys:

1. Heijastajien havaitseminen
2. Heijastajien paikantaminen
3. Heijastajien arvioiminen
4. Heijastajien arvostelu

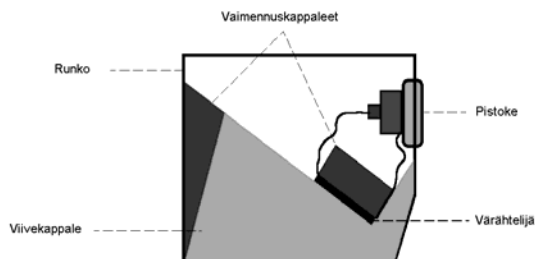
Heijastajien sijasta käytetään yleisesti nimitystä **epäjatkuvuus**. Sillä kuvataan tarkastuskohteessa olevaa ”vian mahdollisesti sisältävää poikkeamaa tarkastuskohteessa”. Vasta epäjatkuvuuden paikantamisen, arvioimisen ja tunnistamisen jälkeen voidaan sanoa, onko kyseessä tarkastuskohteen käyttöä haittaava vika. Sanaa ”epäjatkuvuus” käytetään siis siihen saakka kunnes ollaan varmoja, onko kyseessä vika.

3. Epäjatkuvuuksien havaitseminen

Ultraäänitarkastuksen todellinen ”työkalu” on luotain, kuva 1a ja 1b.

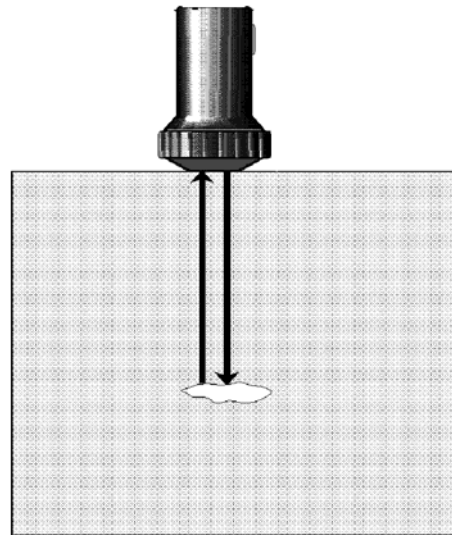


Kuva 1 a
Normaaliultraääniluotain (leikkaus)

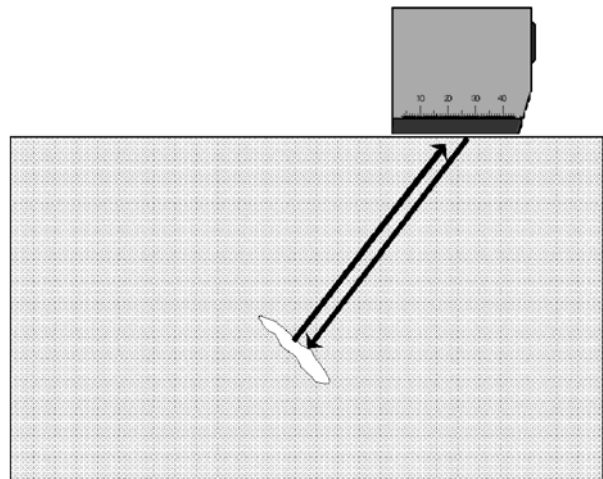


Kuva 1 b
Kulmaultraääniluotain (leikkaus)

Erittäin lyhyen sähköpulssein vastaanottava pietsosähköinen muunnin lähettää ultraäänipulssein. Vastaanottaessaan äänen sama muunnin muuntaa äänen sähköiseksi pulssiksi. Luotain kytketään tarkastuskohteelle nesteen tai kytkentäaineen avulla, jotta ääni kulkisi luotaimesta kohteeseen ja takaisin. Luotainta liikutetaan kappaleen pinnalla tasaisin välein. Samanaikaisesti seurataan mahdollisista epäjatkuvuuksista saatavia kaikuja, kuva 2.

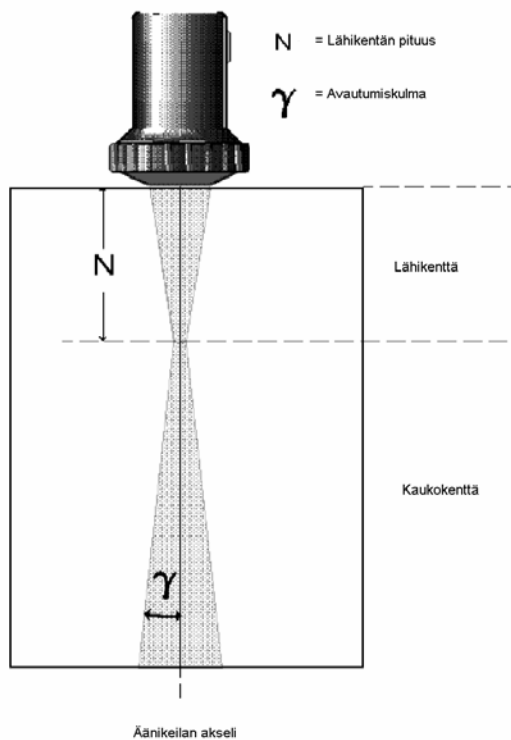


Kuva 2a
Tasomainen vika - normaaliluotain



Kuva 2b
Tasomainen vika - kulmaluotain

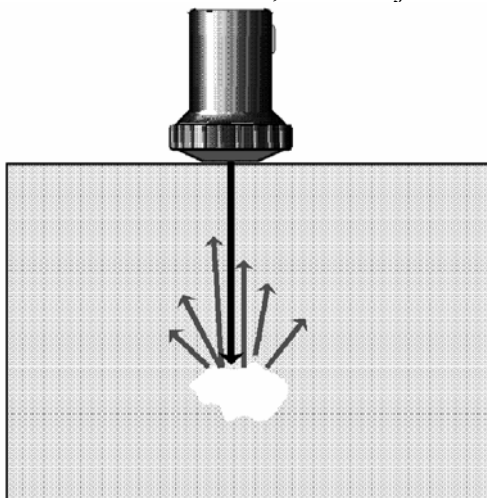
Jokaisella luotaimella on oma vaikutusalue eli ääniaallot peittävät vain tietyn alueen tarkastuskohteesta. Tätä aluetta kutsutaan äänikeilaksi. Sen koko ja muoto ovat luotaimesta ja tarkastettavasta materiaalista riippuvaisia. **Äänikeila** voidaan jakaa kahteen eri alueeseen. Alueet ovat fokuoiva alue eli **lähikenttä** ja laajeneva alue eli **kaukokenttä**, kuva 3.



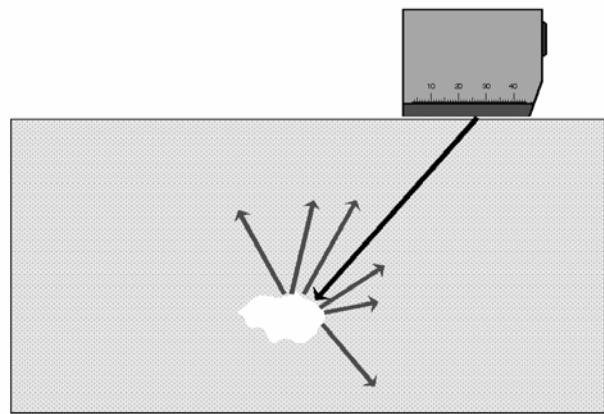
Kuva 3
 Äänikeila

Lähikentän pituus (N) ja **avautumiskulma (γ)** riippuvat muuntimen halkaisijasta, taajuudesta ja materiaalin äänennopeudesta. Äänikeilan keski-
 linjaa kutsutaan **äänikeilan akseliksi**. Äänikeilan muoto on tärkeää tarkastukseen sopivaa luotainta valittaessa. Tarkastuksen ratkaisun kannalta riittää usein vain keskiakselin esittäminen.

Tilaa ottava epäjatkuvuus (kolo, sulkeuma jne.) heijastaa ääntä eri suuntiin, kuva 4a ja 4b:

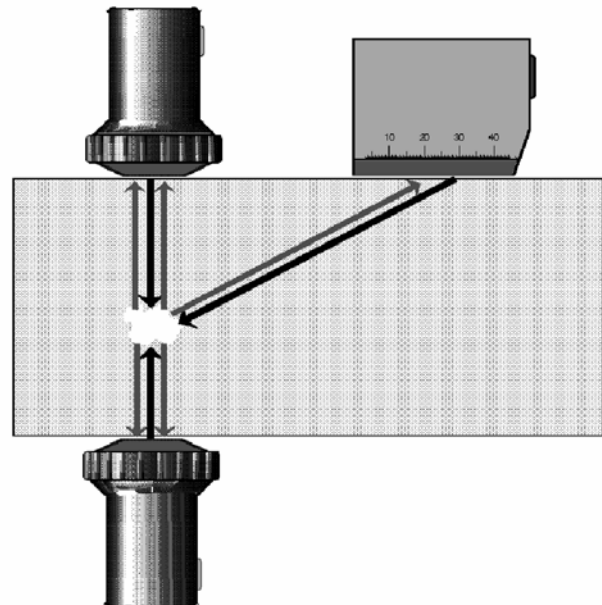


Kuva 4 a
 Tilaa ottava epäjatkuvuus - normaaliluotain



Kuva 4 b
 Tilaa ottava heijastaja - kulmaluotain

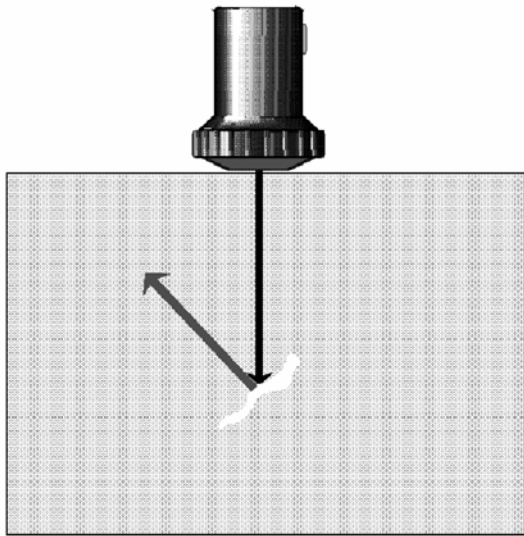
Luotaimen takaisin heijastuvan äänen määrä on riippumaton äänen tulosuunnasta. Eli on lähes samantekevää suoritetaanko tarkastus käyttäen normaali- tai kulmaluotainta ja miltä puolelta kappaletta luotaus suoritetaan, kuva 5.



Kuva 5
 Tilaa ottava heijastaja - luotaus eri suunnista

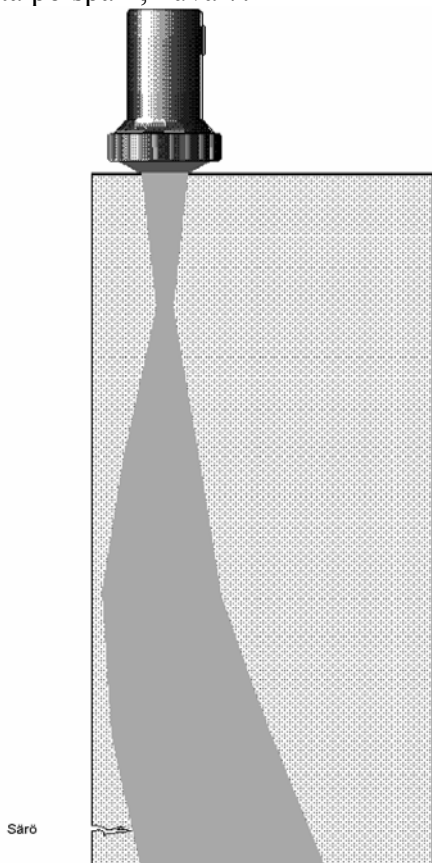
Mikäli luotaimen palaavan äänen määrä on riittävä, ei tilaa ottavan epäjatkuvuuden havaitseminen ole kriittistä, eli se voidaan havaita eri suunnilta.

Tasomainen epäjatkuvuus (rajapinta, särö) heijastaa äänen tiettyyn suuntaan, kuva 6.



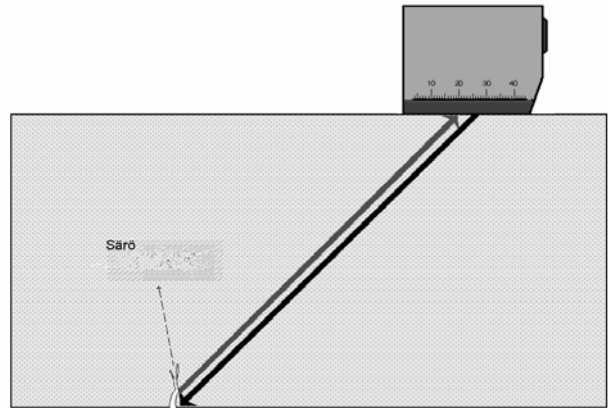
Kuva 6
Heijastuminen vinosta tasomaisesta heijastajasta

Jos ääni ei heijastu takaisin luotaimiin, on epäjatkuvuuden havaitseminen epävarmaa. Vain silloin kun tasomainen epäjatkuvuus kohdataan kohtisuoraan, on sen havaitseminen todennäköisyys suuri. Tämä koskee kappaleen sisäisiä epäjatkuvuuksia. Kappaleen pintaan asti kohtisuoraan avautuvia tasomaisia heijastajia, kuten pintasäröjä, ei havaita kohtisuoraan tulevan äänen avulla, koska ääni ohjautuu kappaleen sivuseinistä pois päin, kuva 7.

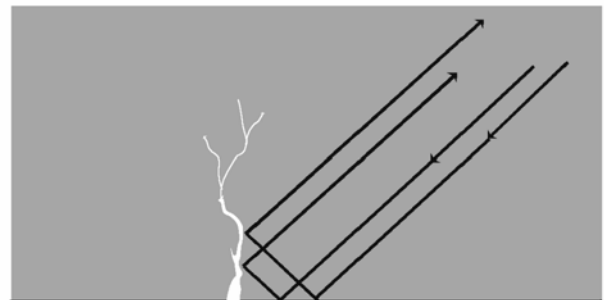


Kuva 7
Äänen ohjautuminen sivuseinästä

Särön havaitseminen todennäköisyys on suuri sellaisissa tapauksissa, joissa voidaan hyödyntää **nurkkaheijastusta**, kuva 8a. Ääni heijastuu särön ja pinnan välisestä 90° kulmasta takaisin luotaimiin, kuva 8b.

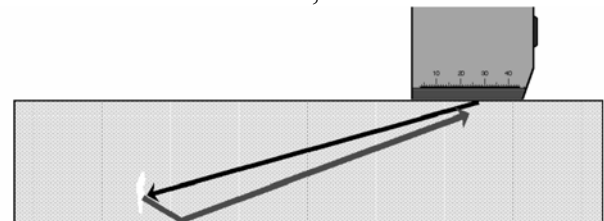


Kuva 8a
Pintasärön havaitseminen 45° -kulmalla



Kuva 8 b
Nurkkaheijastus

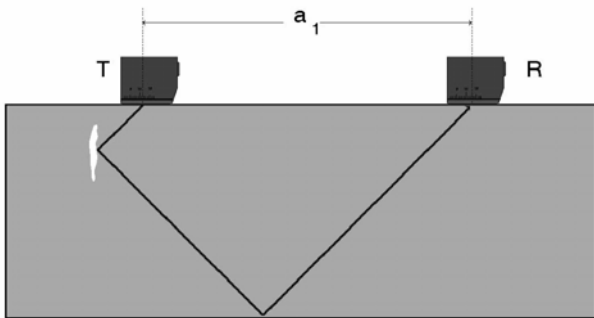
Nurkkaheijastusta voidaan hyväksikäyttää vielä silloinkin, kun särö ei ulotu aivan pintaan asti, olettaen, että säröstä saatava ääni heijastuu vielä pinnan kautta luotaimiin, kuva 9.



Kuva 9
Lähellä pintaa oleva tasomainen heijastaja

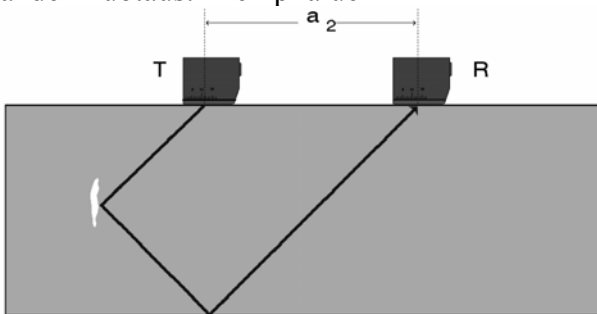
Tämä ei ole useinkaan mahdollista tasomaisilla epäjatkuvuuksilla paksuseinämaisissä kohteissa. Ääni ei enää heijastu takaisin luotaimiin. Toisen luotaimen avulla voidaan vastaanottaa heijastuva ääni ja havaita epäjatkuvuus. Tällaisessa **tandem**-luotauksessa toinen luotain on lähetin ja toinen vastaanotin. Luotaimia liikutetaan kiinteällä etäisyydellä toisiinsa nähden kappaleen pinnalla. Luotaimien välisestä etäisyydestä

riippuen etsitään eri syvyysalueilla olevia tasomaisia heijastajia, kuva 10 a - c.



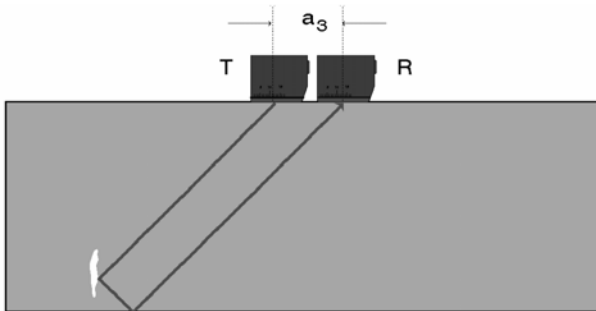
Kuva 10 a

Tandem luotaus: Ylempi alue



Kuva 10 b

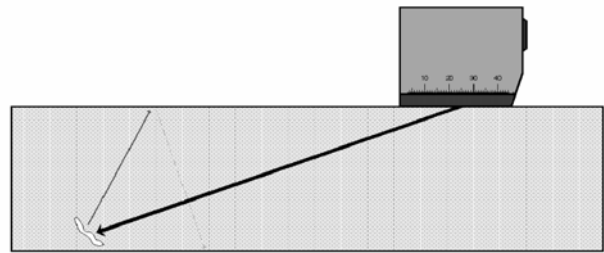
Tandem luotaus: keskialue



Kuva 10 c

Tandem luotaus: alempi alue

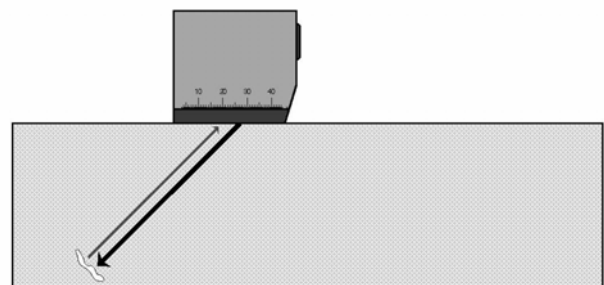
Myös ohutseinämaisissä kappaleissa on mahdollista, että tasomaiset epäjatkuvuudet jäävät havaitsematta, koska niitä ei kohdata kohtisuoraan, kuva 11 a.



Kuva 11a

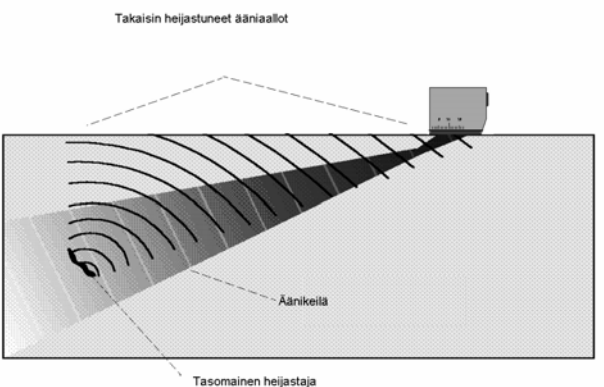
Epäedullinen luotauskulma

Havaitsemis todennäköisyyttä voidaan kuitenkin huomattavasti parantaa valitsemalla luotaimen kulma ja taajuus sopiviksi. Yhdellä luotaimella suoritettava tarkastus on yksinkertaisempaa kuin tandem-luotaus. Tämä pätee erityisesti alle 30 mm hitseillä. Tietysti todennäköisyys tasomaisten epäjatkuvuuksien havaitsemiseen pienenee, mutta usein tämä puute voidaan kompensoida uudella tarkastuksella eri kulmalla, kuva 11 b, tai valitsemalla matalataajuisempi luotain, kuva 11 c. Tarkastuslaajuuden määräykset löytyvät esimerkiksi hitsien tarkastusohjeista.



Kuva 11b

Oikein valittu luotauskulma



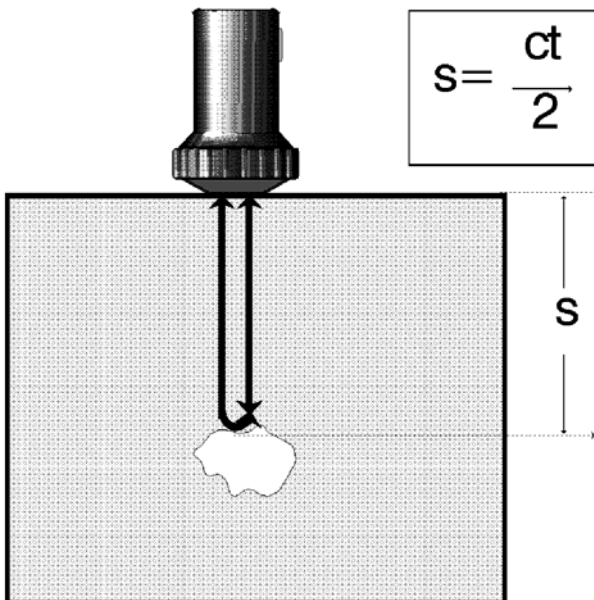
Kuva 11 c

Luotaus 2 MHz :llä: suuri avautumiskulma

4. Tarkastusmenetelmät ja laitetekniikka

4.1 Ultraäänilaite

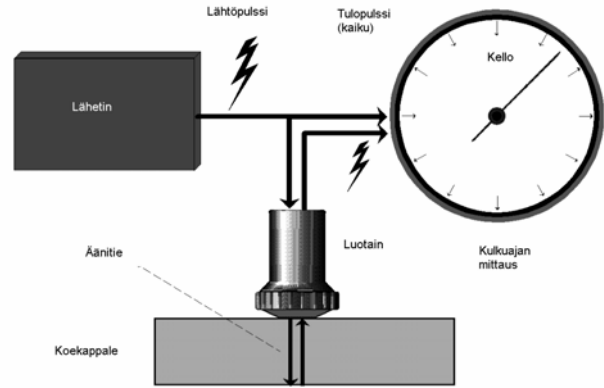
Ennen erilaisten tarkastusten ratkaisuja on käytävä tarkemmin läpi ultraäänitekniikkaa laitteineen ja luotaimineen. Epäjatkuvuusien paikantamisen kannalta on selvää, että lähetettävien ultraääni-pulssien on oltava mahdollisimman lyhyitä, koska halutaan mitata kuluaika luotaimesta epäjatkuvuuteen ja takaisin. Tämä on mahdollista vain silloin kun selvä aloitus- ja lopetushetki ovat olemassa. Mikäli tarkastuskohteen äänennopeus tunnetaan, voidaan yksinkertaisen kaavan avulla laskea epäjatkuvuuden etäisyys ja määrittää sen tarkka sijainti tarkastuskohteessa, kuva 12.



Kuva 12

Äänitie kulkuajan funktiona

Äänen heijastuksia kuuluvalla alueella kutsutaan kaiuiksi. Yhtä hyvin voidaan tätä lyhyttä ja sopivaa nimeä käyttää myös ultraäänipulsseille. Tällä tavoin voidaan helposti ymmärtää eniten käytettyä **pulssikaiku-menetelmää**, kuva 13.



Kuva 13

Lohkokaavio: ultraäänilaite

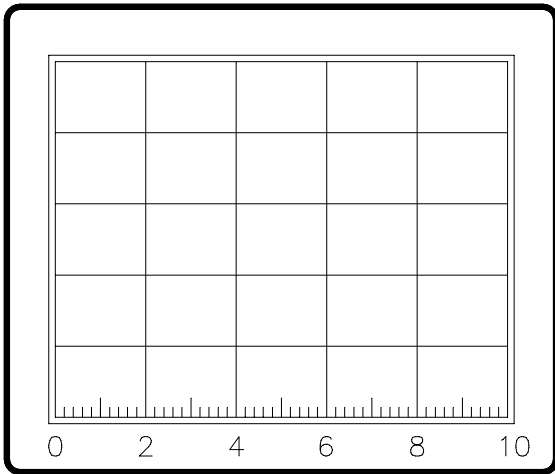
Ajan mittaus alkaa sähköisestä lähtöpulssista, eli erittäin lyhyestä muuntimien tulevista sähköisestä latauksesta, joka muuttuu äänipulssiksi. Tämä ääni kulkee kappaleen läpi ja heijastuu takaisin luotaimen epäjatkuvuudesta tai vastakkaisesta pinnasta. Luotaimessa ääni muuttuu takaisin sähköiseksi pulssiksi, johon ajan mittaus päättyy. Tällöin voidaan heijastajan etäisyys laskea. Jos kuluaika piirretään graafisesti kuvapinnalle, ei puutu paljoonkaan ultraäänilaitteesta, kuva 14.



Kuva 14

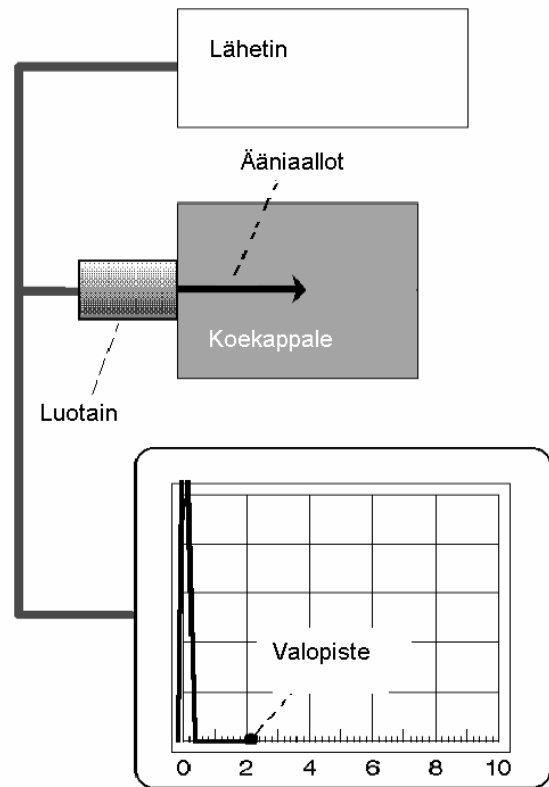
Ultraäänitarkastus käytännössä

Kuvapinnalla näkyvien kaikuja arviointia varten on kuvapinta varustettu asteikolla, kuva 15. Asteikolle on piirretty vaaka- ja pystyrasteri.



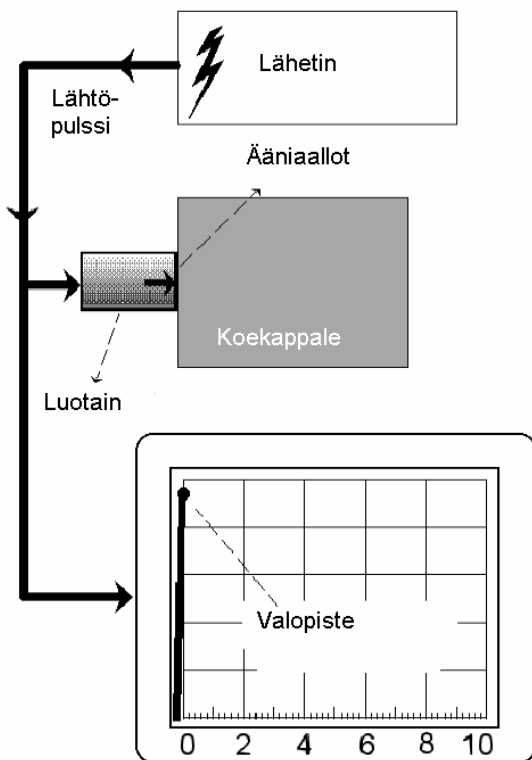
Kuva 15
Kuvapinnan asteikko

Asteikon avulla saadaan mittaustulokset. Miten tämä tapahtuu? Kuten aikaisemmin on todettu, lähettää sähköpulssein saava muunnin äänipulssin. Tämä sama lähtöpulssi tulee myös vahvistimen sisäänmenoon, joka aiheuttaa valopisteen pystyliikkeen kuvapinnan vasemmasta reunasta, kuva 16 a.



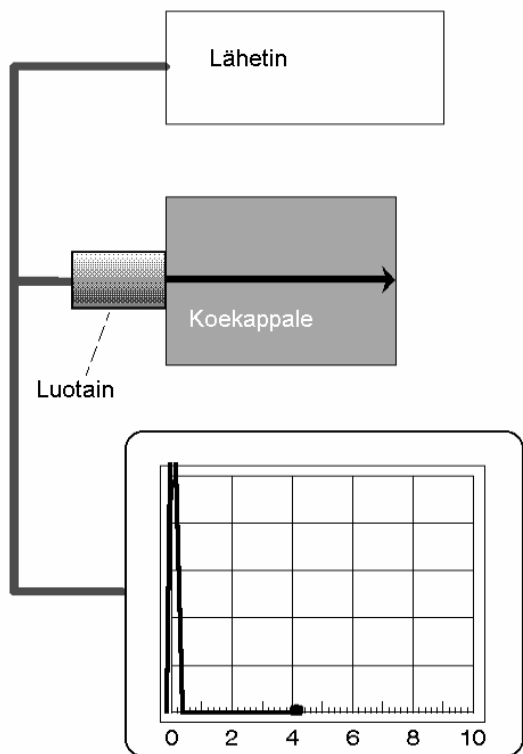
Kuva 16 b
10 μ s:n jälkeen

Pisteen liikkumisnopeus on riippuvainen tarkastuskohteen äänennopeudesta. Pisteen siirtonopeus on säädettävissä. Valopisteen nopeus voidaan sovittaa äänennopeuteen. Oletetaan, että valopisteen nopeus on säädetty siten, että valopiste on asteikolla kohdalla 4, kun ääni on saavuttanut kappaleen vastakkaisen puolen, kuva 17a.



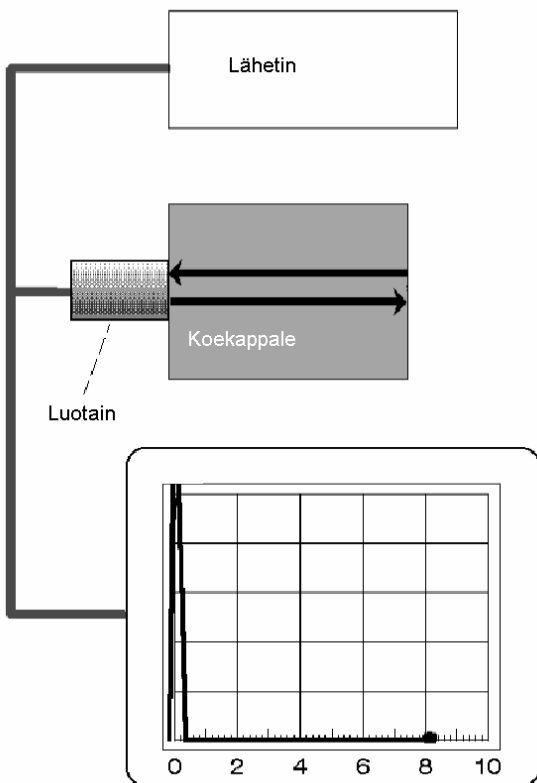
Kuva 16 a
Lähtöpulssi = aloituskohta

Samanaikaisesti valopiste liikkuu kuvapinnan vasemmasta reunasta vakionopeudella **peruslinjaa** pitkin oikealle, kuva 16 b.



Kuva 17 a
Valopiste kuvapinnalla kohdalla 4

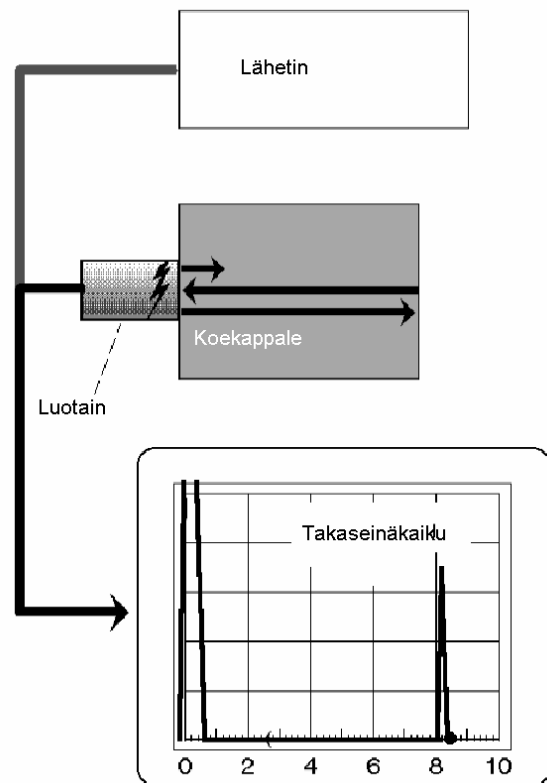
Ääni tarvitsee saman ajan palataksaan takaisin, eli valopiste on asteikolla kohdalla 8, kuva 17 b.



Kuva 17 b
Valopiste kuvapinnalla kohdalla 8

Luotaimeen takaisin kytkentäaineen kautta palaava osa äänestä aiheuttaa sähköisen pulssin,

joka siirtää valopistettä ylöspäin kulkiessaan vahvistimen kautta ja näkyy **takaseinäkaikuna**, kuva 18.



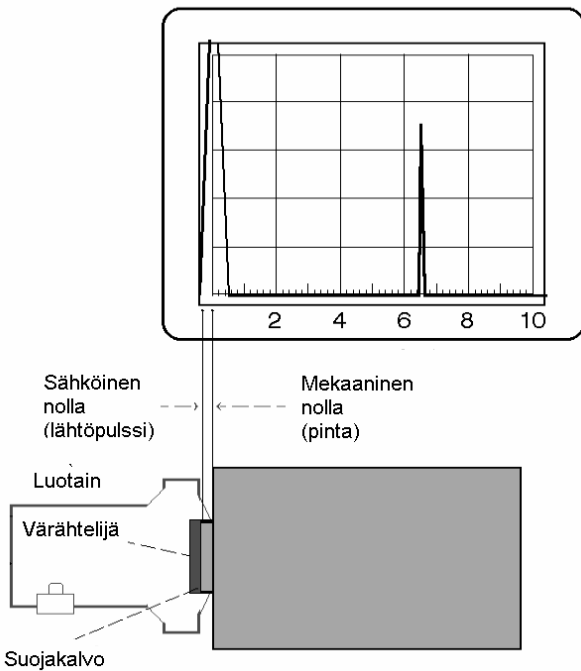
Kuva 18
Takaseinäkaiku kuvapinnalla kohdalla 8

Poikkeama on vain lyhytaikainen, koska erittäin lyhyt äänipulssi aiheuttaa myös lyhyen sähköpulsin. Valopiste palaa nopeasti takaisin perusviivalle ja jatkaa matkaa edelleen oikealle. Samanaikaisesti suurin osa palaavasta äänestä heijastuu kytkentäpinnasta takaisin kohteeseen.

1. Syntyneestä kuvasta saadaan kaksi mittauservoa:
Vaakasijainti:
kaiun vasen reuna asteikolla kohdalla 8
2. *Pystysijainti:*
kaiun korkeus 70% kuvapinnan korkeudesta, kuva 18

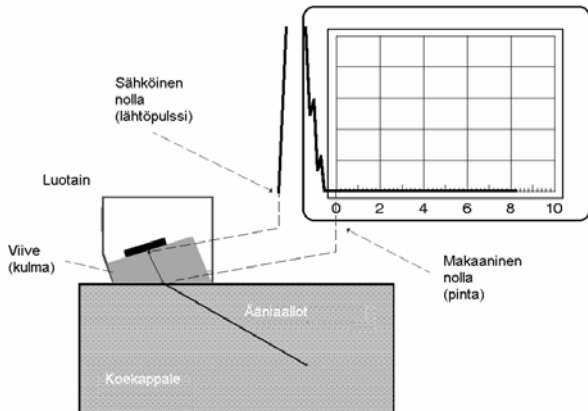
Tämä ei kerro vielä paljon; mutta myöhemmin tulee esille, että lähes kaikki käytettävissä olevat tulokset perustuvat näihin kahteen mittauservoon. Tarkistellaan saavutettua mittaustulosta hieman tarkemmin: Korkea lähtöpulssi alkaa vasemmalta asteikon nollakohdalta. Nousukohta vastaa sitä hetkeä, jolloin sähköpulssti tulee muuntimeen ja ääni muodostuu. Ennen tarkastuskohteen pintaan osumistaan on äänen kuljettava kuitenkin luotaimen suoja-pinnan (viive) läpi. Vaikka se

olisi ohut, kuluu sen läpäisyyn hetki. Tämän ajan verran on nollepiste siirrettävä kuvapinnalla vasemmalle, kuva 19 a.



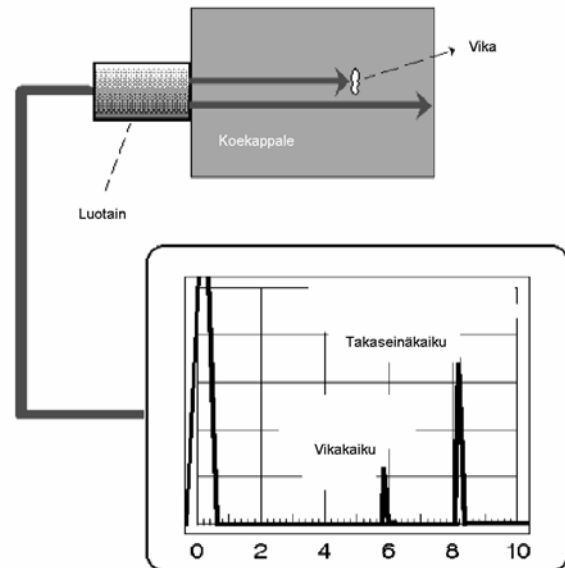
Kuva 19 a
Normaaliluotain: Lähtöpulssin siirto

Kulmaluotaimessa on äänen kuljettava huomattavasti pidempi matka pleksin läpi, ennen kuin se siirtyy kappaleeseen. Luotain-tyypistä riippuen voi siirto olla niin pitkä, ettei se mahdu kuvaruudulle, kuva 19 b.



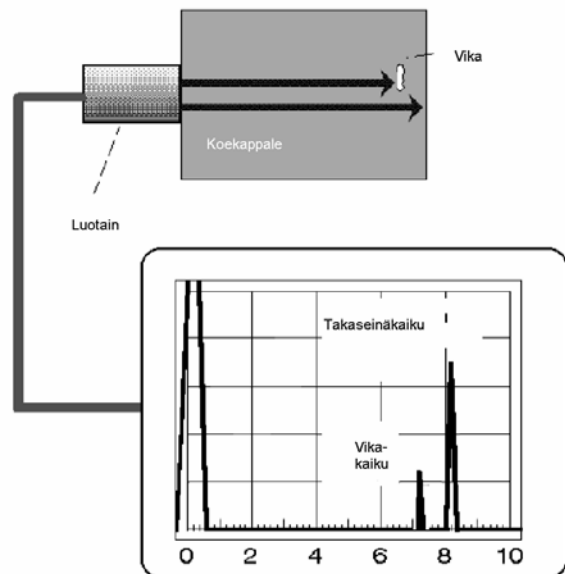
Kuva 19 b
Kulmaluotain: lähtöpulssin siirto

Asteikon kohdalla 8 olevaa kaikua voidaan tarkastella tarkemmin: Se vastaa vastakkaisesta seinämästä heijastunutta ääntä eli on takaseinäkaiku. Nyt ei ole vaikeaa ymmärtää, että äänikeilassa oleva heijastaja, esimerkiksi halkeama aiheuttaa kaiun lähtöpulssin ja takaseinäkaipun välille. Ääni heijastuu osittain epäjatkuvuudesta, kuva 20.

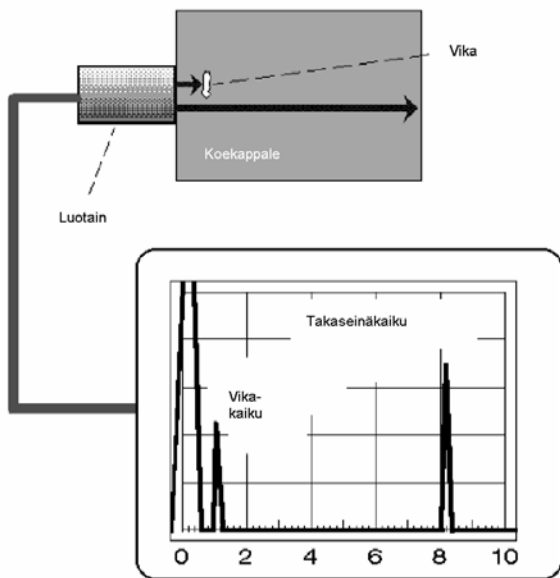


Kuva 20
Viasta saatava kaiku kuvapinnalla

Tällaista kaikua kutsutaan **välikaiuksi**. Se, miten välikaiun sijainti muuttuu heijastajan syvyyden muuttuessa, on esitetty kuvassa 21 a ja b. Välikaiun paikka suhteessa takaseinäkaikuun muuttuu sen sijainnin mukaisesti takaseinäkaikuun nähden. Tällä tavoin voidaan vikojen paikka määrittää; tarkastajat puhuvat epäjatkuvuuksien **paikantamisesta**.



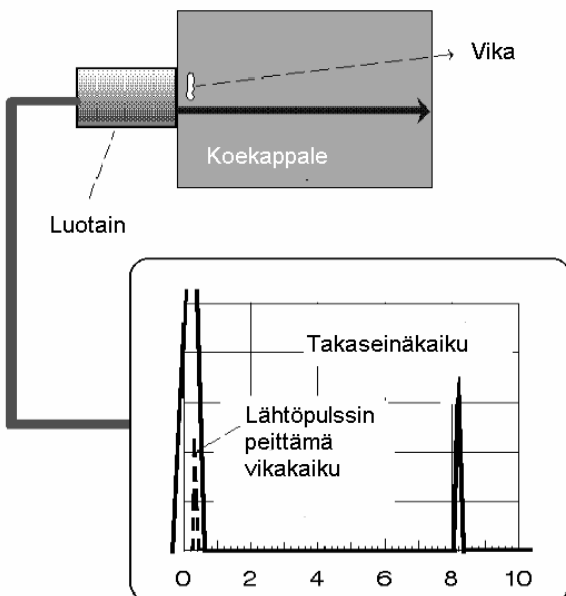
Kuva 21 a
Lähellä takaseinää oleva vika



Kuva 21 b
Lähellä pintaa oleva vika

4.2 Lähierotuskyky

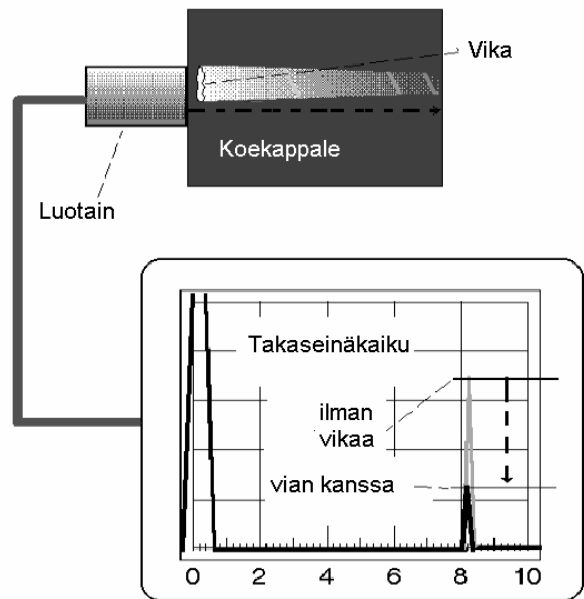
Mitä tapahtuu, kun lähellä pintaa luotaimen alla on pieni epäjatkuvuus? Voidaanko tällainen heijastaja vielä havaita? Vastaus on ei! Välikaiku jää lähtöpulssin kohdalle ja jää sen alle. Mahdollisesti ei ole myöskään muita viitteitä siitä, että pinnan lähellä olisi epäjatkuvuus, kuva 22.



Kuva 22
Lähellä pintaa oleva heijasta, ei havaittavissa

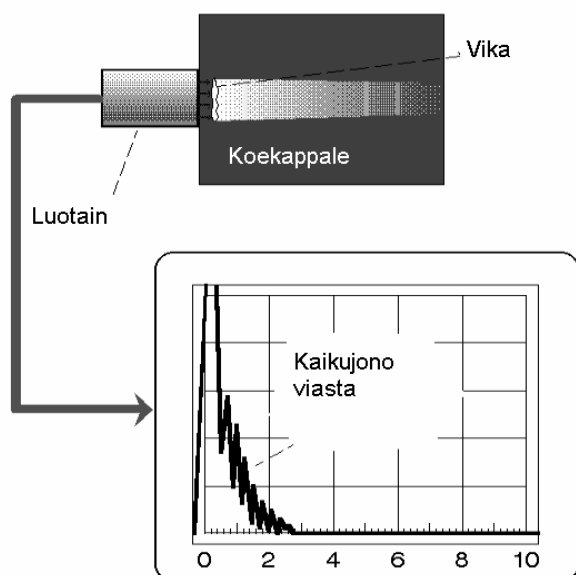
Vai onko olemassa jokin toinen tapa, jolla peittoon jäänyt välikaiku (lähellä pintaa olevasta epäjatkuvuudesta) voidaan havaita? Kyllä on,

silloin kun epäjatkuvuus on tarpeeksi suuri peittämään äänikeilasta niin suuren osan, että takaseinäkaiku pienenee, kuva 23.



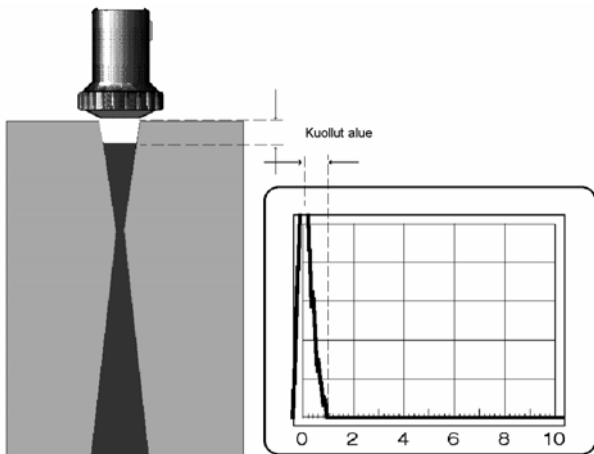
Kuva 23
Takaseinäkaikuien vaimeneminen lähellä pintaa olevan suuren vian johdosta

Pinnan lähellä olevan epäjatkuvuuden ollessa sekä tasainen että pinnan suuntainen syntyy enemmän tai vähemmän selvä kaikujono äänen heijastuessa edestakaisin pinnan ja epäjatkuvuuden välillä, kuva 24. Etäisyyden kasvaessa pienenee kaiku-korkeus. Mitä lähempänä epäjatkuvuus on pintaa, sitä enemmän kaikuja häviää lähtöpulssiin ja sitä lähempänä kaiut ovat toisiaan. Myös tällaisissa tapauksissa on havaittavuudelle olemassa raja.



Kuva 24
Kaikujono pinnan lähellä olevasta viasta

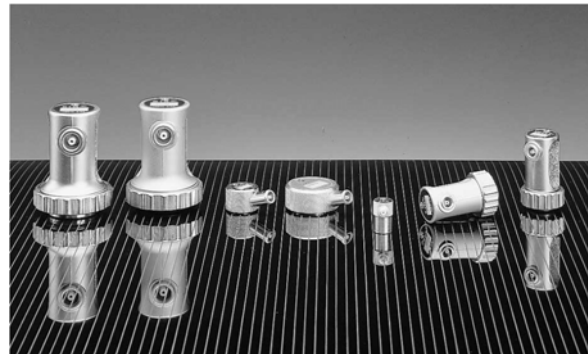
Tästä kaikesta voidaan päätellä, että lähtöpulssi ei ole tervetullut, vaikkakin teknisesti välttämätön paha: Se rajoittaa lähellä pintaa olevien epäjatkuvuuksien havaitsemista. Heijastajia, jotka sijaitsevat **kuolleella alueella** eli välittömästi pinnan alla tarkastamattomalla alueella, ei voida enää havaita, kuva 25. Kuollut alue on riippuvainen luotaimesta ja laitteesta. Se voidaan siten minimoida luotaimen ja laitteen oikealla valinnalla.



Kuva 25 Kuollut alue

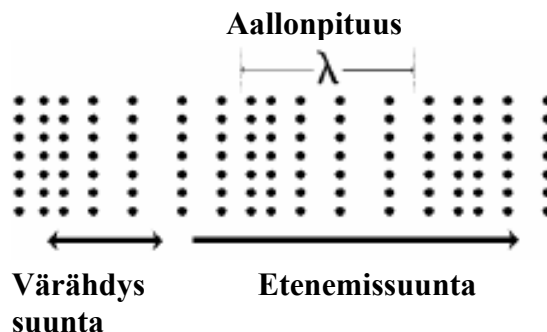
4.3 Luotain

Ääntä kohtisuoraan pintaan nähden lähettävää ja vastaanottavaa luotainta kutsutaan **normaaliluotaimeksi**, kuva 1 a ja 26.



Kuva 26
Normaaliluotaimet

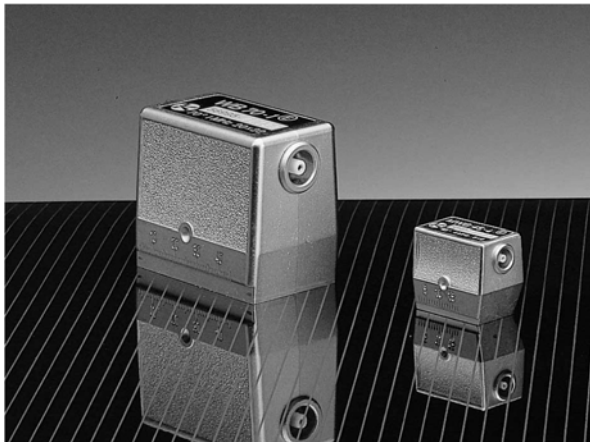
Useimmat normaaliluotaimet lähettävät **pitkittäisaaltoa** (paineaalto). Ne tunnistaa siitä, että ne etenevät kaikissa materiaaleissa tiheytymien ja harventumien välityksellä, kuva 27.



Kuva 27
Pitkittäisaalto

Normaaliluotaimia on olemassa suuri valikoima eri kokoisina ja taajuisina 0,5 - 25 MHz. Niiden avulla voidaan saavuttaa yli 10 m etäisyys ja näin tarkastaa suurimpiakin kappaleita. Laaja valikoima mahdollistaa luotaimen ominaisuuksien sovittamisen kaikkiin tarkastustehtäviin. Yhden joissakin tapauksissa merkittävän normaaliluotaimen rajoituksen olemme äsken oppineet tuntemaan: Lähtöpulssin leveydestä johtuva huono pintaa lähellä olevien epäjatkuvuuksien havaitsemisominaisuus.

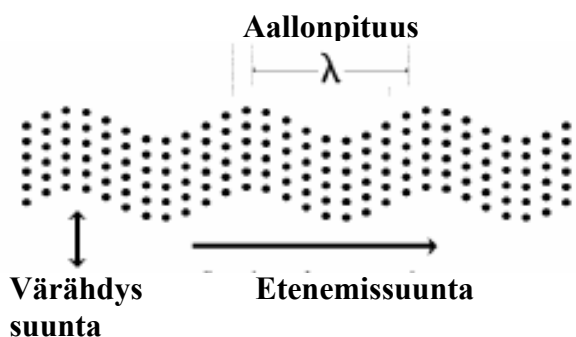
Vinosti pintaan nähden ääntä lähettäviä ja vastaanottavia luotaimia kutsutaan **kulmaluotaimiksi**, kuva 1b ja 28.



Kuva 28
Kulmaluotaimet

Useimmat kulmaluotaimet lähettävät ja vastaanottavat **poikittaisaaltoja** tai leikkausaaltoja.

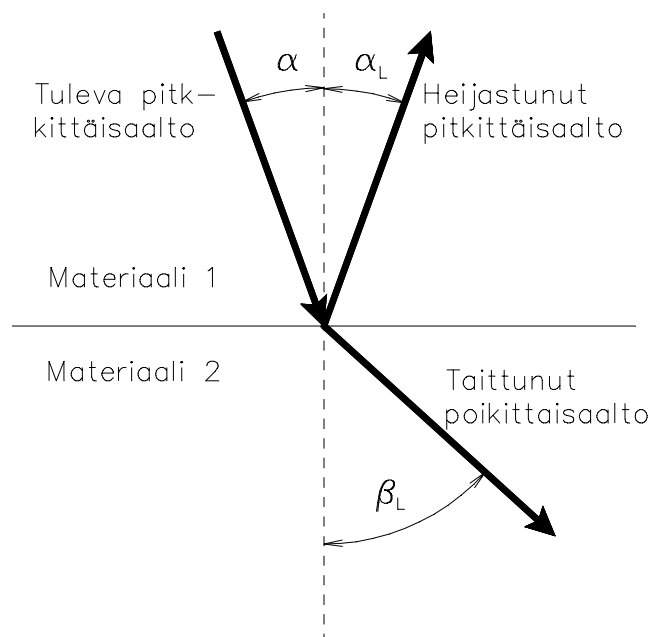
Poikittaisaalloilla värähtelevät atomit (molekyylit) poikittain aallon etenemissuuntaan nähden, kuva 29. Äänen värähtely tapahtuu leikkausvoimien vaikutuksesta. Poikittaisaallot etenevät vain kiinteissä aineissa, eli ei koskaan nesteissä ja kaasuissa. Tämän lisäksi poikittaisaallot etenevät huomattavasti hitaammin kuin pitkittäisaallot samassa materiaalissa. Kysymykseen, miksi kulmaluotaimet eivät lähetä pitkittäisaaltoja, ei voida antaa lyhyttä vastausta. Tähän tarvitaan laajempi selvitys.



Kuva 29
Poikittaisaalto

4.4 Taittuminen ja aaltomuodonmuutos

Kulmassa etenevät aallot syntyvät lähes poikkeuksetta siten, että ääniaallot kohtaavat luotaimen ja kappaleen välisen rajapinnan kulmassa, kuva 1 b. Helpommin tällainen saadaan liimaamalla pleksi kiila luotaimen. Pitkittäisaallon kohdatessa tietyllä kulmalla pleksi/teräs-rajapinnan, hajoaa tuleva ääni heijastuvaan ja taittuvaan osaan, kuva 30 a:



Kuva 30a
Heijastuminen ja taittuminen ilman poikittaisaaltoa

Heijastunut ääni kuuluu heijastuslakiin (tulokulma = heijastuskulma) ja taittunut aalto käyttäytyy seuraavan kaavan mukaan:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c_1}{c_2}$$

α = tulokulma

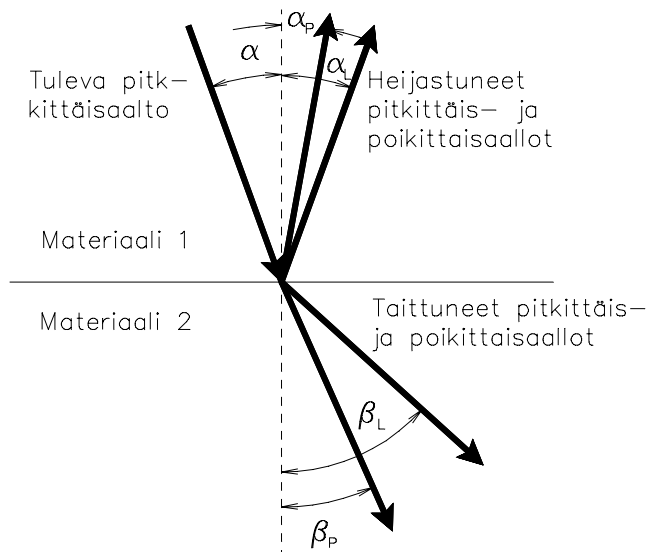
β = taittumiskulma

c_1 = äänennopeus materiaalissa 1

c_2 = äänennopeus materiaalissa 2

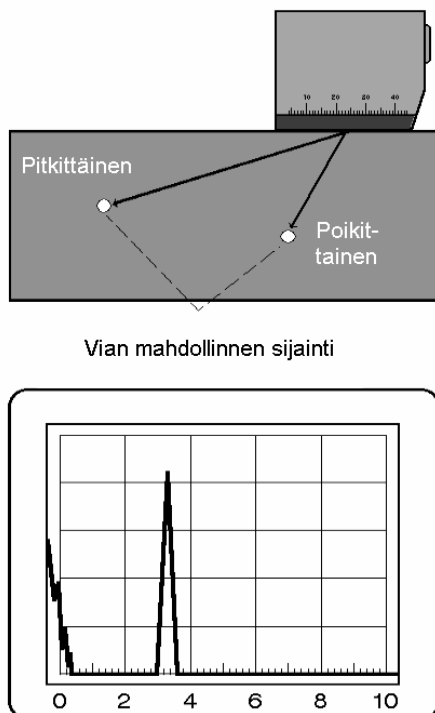
Lisäksi tapahtuu jotakin muuta: Äänen kohtaamis-kohdassa muodostuu poikittaisaaltoa, kuva 30 b. Sekä heijastus- että taittumispuolella! Koska poikittaisaallojen etenemisnopeus on vain noin puolet pitkittäisaallon etenemisnopeudesta, saadaan laskentakaavan avulla poikittaisaalloille

eri heijastumis- ja taittumiskulmat kuin pitkittäisaalloille.



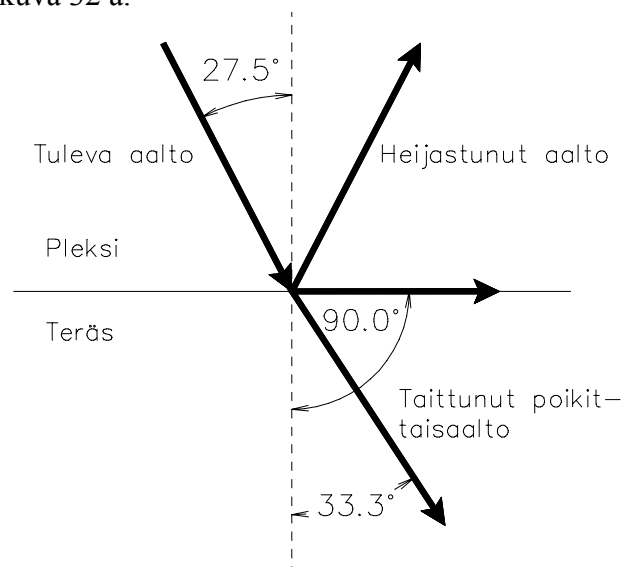
Kuva 30 b
Heijastuminen ja taittuminen poikittaisaalloilla

Mikäli aaltomuodon muutosta ei oteta huomioon, on epäjatkuvuuksien paikantaminen ja arvostelu useimmissa tapauksissa mahdotonta. Joissakin tapauksissa jopa epäjatkuvuuksien löytäminen on kyseenalaista. Kuvapinnalle voi tulla kaiku kahdesta eri kohdasta riippuen siitä, käytetäänkö poikittais- vai pitkittäisaaltoja, kuva 31.



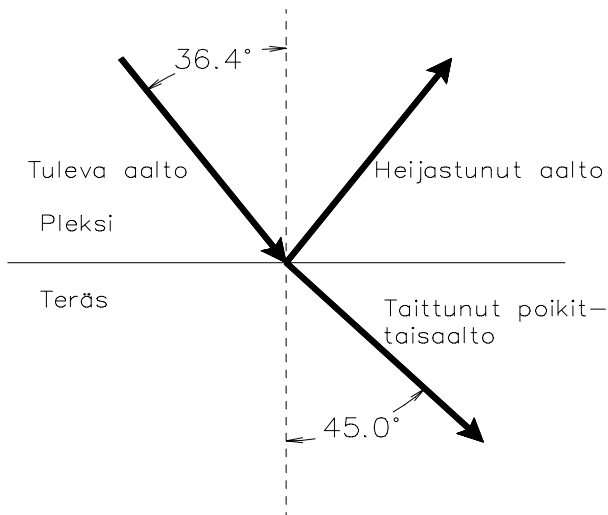
Kuva 31
Paikantaminen: yksi kaiku = kaksi heijastajaa

Missä epäjatkuvuus todellisuudessa sijaitsee? Tarkastaja voi olla varma asiasta vain silloin, kun käytössä on vain yksi aaltomuoto. Tämä on epäilemättä edellytys kulmaluotainten yleiselle käytölle. Tämä edellytys saadaan laskentakaavasta: Tiedetään, että pitkittäisaaltojen taittumiskulma on noin kaksinkertainen poikittaisaallojen taittumiskulmaan verrattuna, kuva 30 b. Suurentamalla tulokulmaa kasvaa taittumiskulma β , kunnes lopulta tulokulmalla $27,5^\circ$ (**1. kriittinen kulma**) pitkittäisaalto taittuu 90° kulmalla. Se kulkee vain rajapintaa pitkin. Poikittaisaallot taittuvat edelleen kappaleeseen, kuva 32 a.

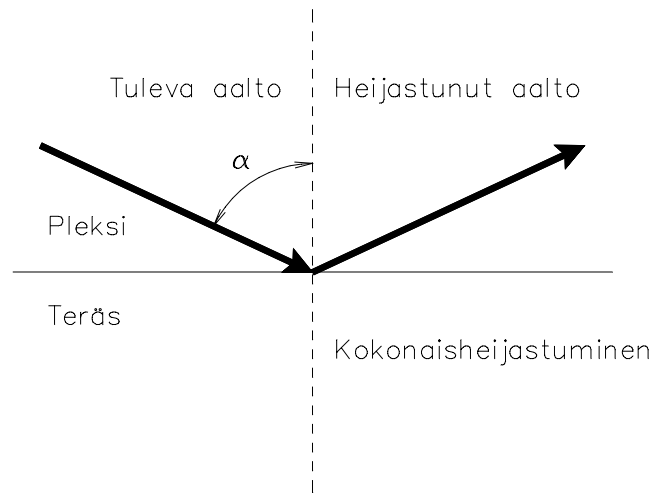


Kuva 32a
Taittuminen: 1. kriittinen kulma

Tällä tavoin on vaatimus heijastajan arvosteluun täytetty: Materialissa on vain **yksi** ääniaalto joka on poikittaisaaltoa kulmassa $33,3^\circ$ (pleksi/teräs). Edelleen suurentamalla tulokulmaa voidaan poikittaisaallon taittumiskulmaa (**luotauskulmaa**) muuttaa, esimerkiksi tasan 45° :ksi, kuva 32 b.

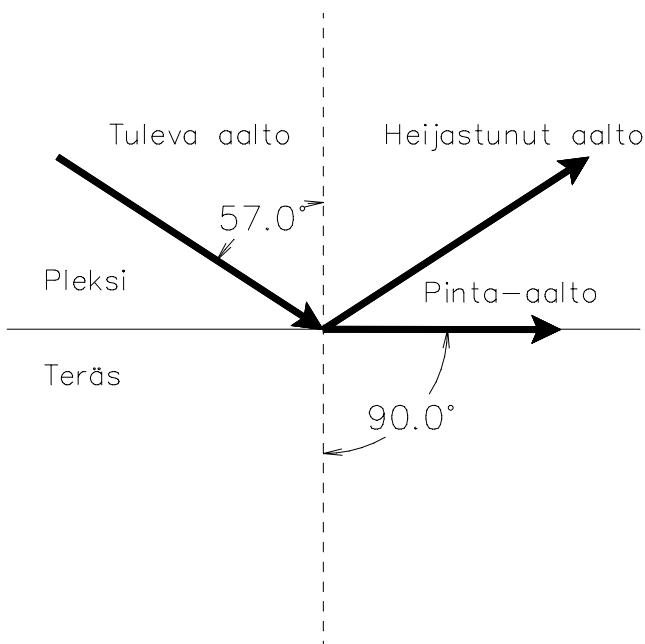


Kuva 32 b
 Taistuminen; vain poikittaisaaltoa kulmassa 45°
 Lopulta tulokulmalla n. 57° (**2. kriittinen kulma**) muuttuu poikittaisaallon kulma 90° ja se etenee kappaleen pinnalla muodostaen pinta-aaltoa, kuva 32 c.



Kuva 32 d
 Kokonaisheijastuminen kun $\alpha > 57^\circ$

Alueella, jolla tulokulma on 1. ja 2. kriittisen kulman välillä ($27,5^\circ - 57^\circ$) saadaan teräskappaleeseen syntymään poikittaisaaltoa alueella $33,3^\circ - 90^\circ$, kuva 33.

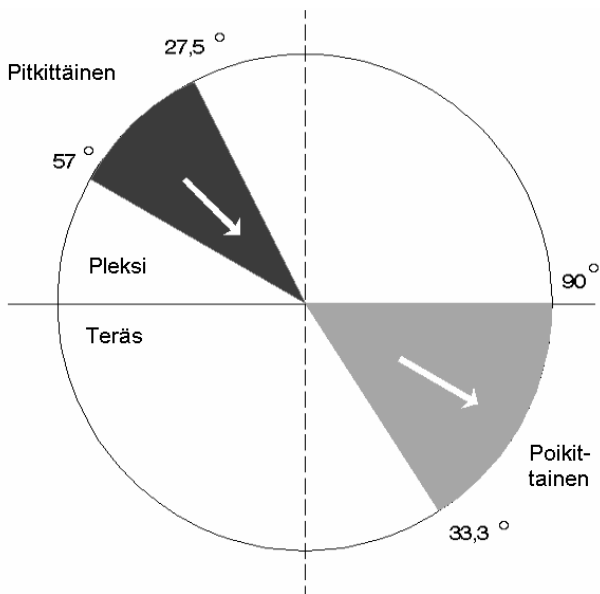


Kuva 32 c
 Taistuminen: 2. kriittinen kulma, pinta-aalto

Tämä on raja, jonka jälkeen kappaleeseen ei enää muodostu ääntä. Tästä alkaa **kokonaisheijastus**, kuva 32d.

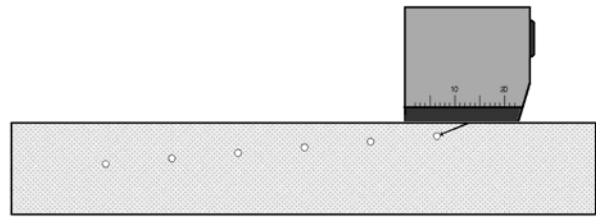
4.5 Kulmaluotaimen ominaisuudet

Useimmissa tapauksissa tarkastetaan terästä, joten kulmaluotain voidaan suunnitella siten, että sille saadaan järkevät luotauuskulmat. Kulmaluotaimia on saatavana kulmilla 35°, 45°, 60°, 70°, 80° ja 90° (pinta-aalto), kuva 33.

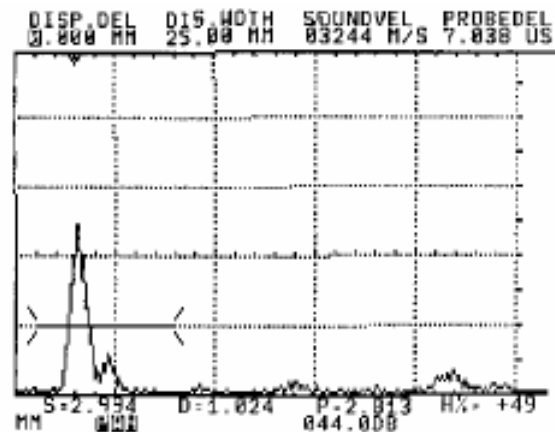


Kuva 33
Käytettävissä oleva alue kulmaluotaimelle

Tavallisimmin käytetään 45°, 60° ja 70° kulmaluotainta. Kulmaluotaimien taajuusvalikoima ei ole niin suuri kuin normaaliluotaimien. Tämä johtuu siitä, että jopa seostamattomilla hienorakeisilla teräksillä poikittaisaallolla on suuri **vaimennus**. Äänienergia absorboituu ja siroaa kulkiessaan materiaalissa niin, että vain suhteellisen pieniä kappaleita voidaan tarkastaa riittävällä herkkyydellä. Mikäli suuremmissa kappaleissa (paksuissa) on havaittava epäjatkuvuuksia, on valittava mahdollisimman matalataajuinen ja suuri-kokoinen luotain. 2 MHz:n kulmaluotaimella voidaan havaita 700 mm päässä oleva 2 mm kokoinen heijastaja. Kulmaluotaimen lähierotus-kyky on usein parempi kuin normaaliluotaimen, koska lähtöpulssi on pitkällä vasemmalla kuvapinnalla johtuen melko pitkästä viiveestä. Lähtöpulssin laskeva oikea reuna saattaa kuitenkin peittää pinnan lähellä olevien epäjatkuvuuksien kaiut. Kuvassa 34 a ja b on esitetty, kuinka vielä 1 mm pinnan alla oleva Ø1 mm poraus voidaan havaita varmasti.



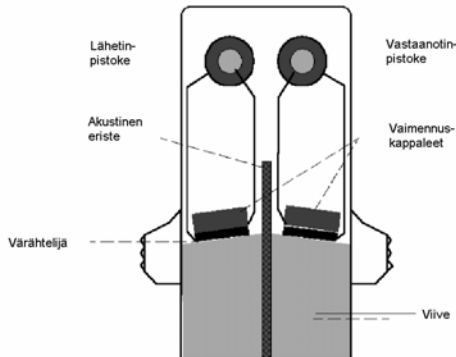
Kuva 34 a
1 mm:n syvyydellä olevan Ø 1 mm:n sivuporausluotauksen luotauksen



Kuva 34 b
Näyttö MWB70-4E kulmaluotaimella

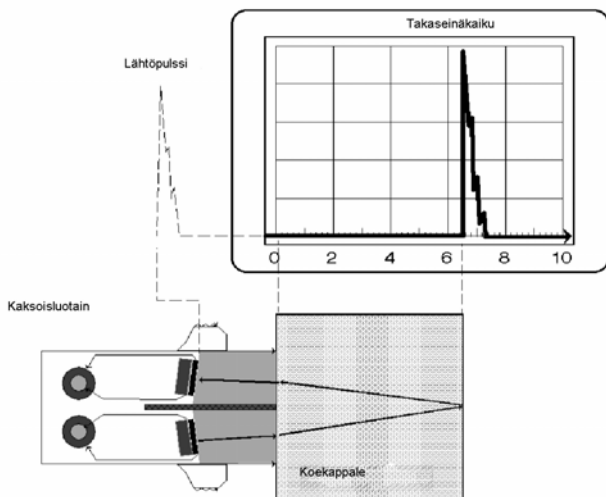
4.6 Kaksoisnormaaliluotain

Mikäli normaaliluotaimelle halutaan yhtä hyvä lähierotuskyky kuin kulmaluotaimelle, on käytettävä **kaksoisnormaaliluotainta**, kuva 35.



Kuva 35
Kaksoisnormaaliluotain: leikkauskuva

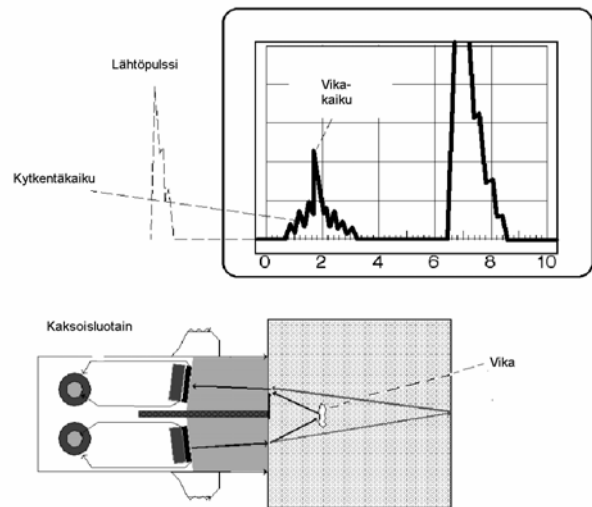
Tällaisella luotaimella käytetään kahta toisistaan akustisesti eristettyä muunninta, jotka on asennettu samaan runkoon. Lisäksi molemman muuntimen eteen on liimattu melko pitkä hieman vinossa oleva viive (pleksistä). Kaksoisluotaimen toinen muuntimista kytketään ultraäänilaitteen lähettimeen ja toinen vahvistimeen. Pitkästä viiveestä johtuen lähtöpulssi on kokonaan poissa kuvapinnalta, kuva 36.



Kuva 36
Kaksoisnormaaliluotain käytössä

Viiveessä syntyvät kerrannaiskaiut eivät häiritse, koska lähettimellä ei ole vastaanottoimintoa. Vasta kun kappaleesta tulee äänipulsseja luotaimen vastaanottimeen, tulee kuvapinnalle kaikuja. Lähettimen ja vastaanottimen sähköinen eristäminen ei ole teknisistä syistä johtuen täysin mahdollista.

Suurella vahvistuksella tai kappaleen pinnan ollessa karhea tapahtuu äänen siirtyminen suoraan lähettimestä vastaanottimeen. Kuvapinnalla tulee häiriökaiku, nimeltään **kytkentäkaiku**. KytKentä-kaiku peittää juuri pinnan läheisen alueen ja vaikuttaa erityisesti pienten pinnan läheisten epäjatkuvuuksien havaitsemiseen. Tavallisesti kytKentäkaiku on niin pieni tai sitä ei edes ole olemassa, että epäjatkuvuudet ovat selvästi havaittavissa, kuva 37.



Kuva 37
Vika- ja kytKentäkaiku

Kaksoisluotain sopii erinomaisesti lähellä pintaa olevien epäjatkuvuuksien etsintään ja ohuiden kohteiden paksuudenmittaukseen. Kaksoisluotain reagoi huomattavasti vähemmän kontaktin muutoksiin, erityisesti karheilla tai kaarevilla pinnoilla. Tämä selittää sen, miksi kaksoisluotaimia käytetään laajasti kemian ja energia-alan teollisuudesta: Ne ovat ideaalisia putkien ja säiliöiden tarkastukseen, korroosion havaitsemiseen ja jäljellä olevan seinämänpaksuuden mittaukseen, kuva 38.



Kuva 38
Paksuusmittaus käytännössä

Erityisillä kuumaluotaimilla voidaan mittaukset suorittaa kappaleen pintalämpötilan ollessa jopa 550° C. Kohde voidaan mitata käytössä ollessaan.

5. Epäjatkuvuuksien paikantaminen

5.1 Ultraäänilaitteen säätö

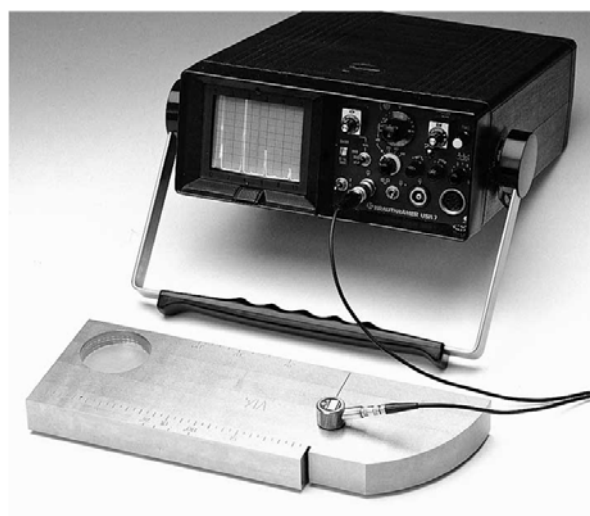
Epäjatkuvuuden sijainti on heti pääteltävissä ultraäänilaitteen kuvapinnalta, kun se on oikein **säädetty**. Säätö tarkoittaa tietyn etäisyysasteikon säätämistä nollapisteestä eteenpäin lineaarisesti kuvapinnalle. Kuvapinnan asteikon kohta 0 vastaa kappaleen pintaa ja asteikon kohta 10 vastaa suurinta haluttua etäisyyttä, esimerkiksi 100 mm terästä, 10 mm alumiinia, 25 mm messinkiä jne. **Mitta-alueen** määrittämiseen liittyy aina mitattava materiaali, koska kaiun paikka eli **äänitie s** johdetaan äänen kulkuajasta ja materiaalin äänennopeudesta seuraavan kaavan avulla:

$$s = \frac{c \cdot t}{2}$$

- s = Äänitie
- c = Äänennopeus
- t = Kulku aika

Tämä kaava ei ole merkityksetön tarkastajalle, muuta sitä ei todellisuudessa tarvita laitteen mitta-asteikon säädössä. Se tehdään yksinkertaisesti seuraavasti:

Käytetään tarkastettavasta materiaalista valmistettua kappaletta, jonka mitat tunnetaan. Kytettäessä luotain tunnetulle paksuudelle d saadaan takaseinäkaikujono, kuva 39.



Kuva 39
Takaseinäkaikujono normaaliluotaimella

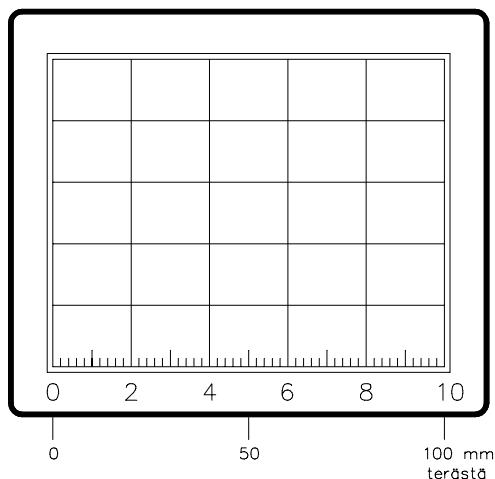
Kulloisetkin äänitiet vastaavat loogisesti äänen kulkemaa matkaa kappaleessa normaaliluotaimella. Ne ovat paksuuden monikertoja, eli: 1. kaiku = d, 2. kaiku = 2d, 3. kaiku = 3d jne. Mitta-alueen säätämiseksi tarvitaan vähintään kaksi kaikuja, joiden paikat säädetään oikeiksi kuvapinnalla. Laite on säädetty oikein, kun lukemalla kaiun paikka asteikolla voidaan äänitie s (etäisyys) heijastajaan määrittää (heijastajien paikantaminen, paksuusmittaus).

5.1.1 Sääto normaaliluotaimella

Säättöön tarkoitettua kappaletta kutsutaan **kalibrointikappaleeksi**. Tarkistuskappaleeksi kutsutaan kappaletta, jonka muoto ja mitat on määritelty standardissa. Tarkistuskappaleen 1 (SFS 3288) paksuus on 25 mm ja se on valmistettu niukkaseostetusta hienorakeisesta teräksestä. Sitä voidaan käyttää lähes kaikkiin säätöihin tarkastettaessa vastaavaa terästä.

Esimerkki 1: Mitta-alue 100 mm terästä.

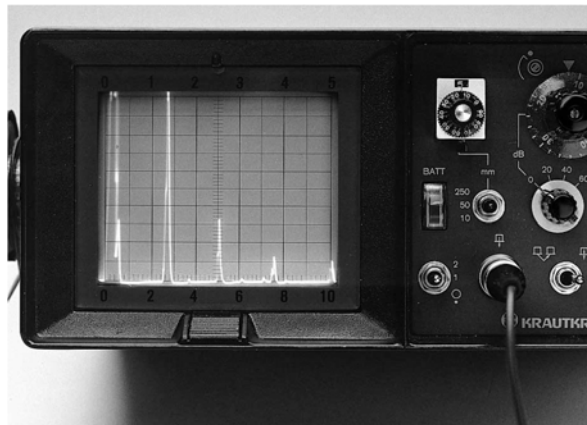
Vaaka-asteikolle säädetään 0 - 100 mm terästä, kuva 40. Asteikon yksi jakoväli vastaa tällöin 10 mm kappaleessa. Asteikon kerroin k vastaa 10 mm /jakoväli.



Kuva 40

Mitta-alue: 0 - 100 mm terästä

Luotain kytketään perusvertailukappaleelle 1, kuva 41.



Kuva 41

Mitta-asteikon säätö 100 mm terästä

Takaseinäkaikujono saadaan 25 mm:stä. Kaikujen paikat asteikolla T_i ja äänitiet s_i ovat seuraavan taulukon mukaisia:

Kaiku No i	Äänitie s_i [mm]	Asteikon kerroin k [mm/jv]	Asteikon kohta T_i [jv]
1	25	10	2,5
2	50	10	5,0
3	75	10	7,5
4	100	10	10,0

Kulloinenkin kaiun paikka asteikolla voidaan laskea seuraavan kaavan avulla:

$$T_i = \frac{s_i}{k}$$

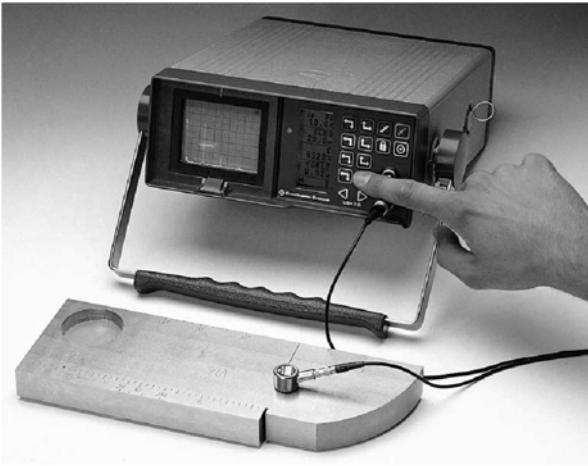
S_i = Äänitie i :n kaikuun

T_i = i :n kaiun paikka asteikolla

k = Asteikon kerroin

Tarkistuskappaleesta saatavien kaikujen tarkka säätö tapahtuu analogisella ultraäänilaitteella pulssinsiirron (tai nollapiste) ja mitta-alueen karkea- ja hienosäädön avulla.

Säätö tapahtuu vuoroittain näillä säädöillä, kunnes kaiun etureunat ovat oikeilla kohdillaan. Digitaalisilla laitteilla valitaan suoraan mitta-alue ja äänennopeus säädetään 5920 m/s. Luotaimen kytkennän jälkeen tarvitsee suorittaa vain luotaimen viiveen kompensointi nollapisteen säädöllä, kuva 42.



Kuva 42

USK7D: Luotaimen viiveen säätö

Esimerkki 2: Mitta-alue 250 mm alumiinia

Asteikon kohta 10 vastaa 250 mm alumiinia: $k = 25$ mm/jakoväli. Normaaliluotain kytetään 80 mm paksuiselle alumiiniselle tarkistuskappaleelle, eli saadaan kaikujono 80 mm välein, kuva 43.



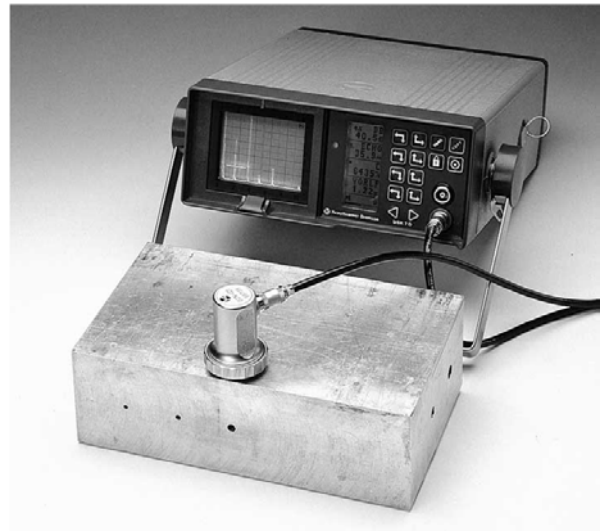
Kuva 43

USK7D: Mitta-alueen säätö 250 mm alumiinia 80 mm:n paksuisen kappaleen avulla

Säätötaulukko näyttää seuraavalta:

Kaiku No i	Äänitie s_i [mm]	Asteikon kerroin k [mm/jv]	Asteikon kohta T_i [jv]
1	80	25	3,2
2	160	25	6,4
3	240	25	9,6

Vasta oikein tehdyn mitta-alueen säädön jälkeen on tarkka heijastajan paikannus mahdollista. Tarkastaja liikuttaa luotainta tarkastettavalla kohteella. Normaalitapauksissa, kun kappaleessa ei ole heijastajia, näkyy kuvapinnalla vain lähtöpulssi ja takaseinäkaiku. Heti kun äänikeilaan osuu epäjatkuvuus, tulee lähtöpulssin ja takaseinäkaikon välille ylimääräinen kaiku. Kuvassa 44 on esimerkiksi asteikon kohdalla 1,4 kaiku. Kun alue oli säädetty 250 mm, saadaan heijastajan paikaksi eli äänitieksi $s = 1,4 \times 25 = 35$ mm.



Kuva 44

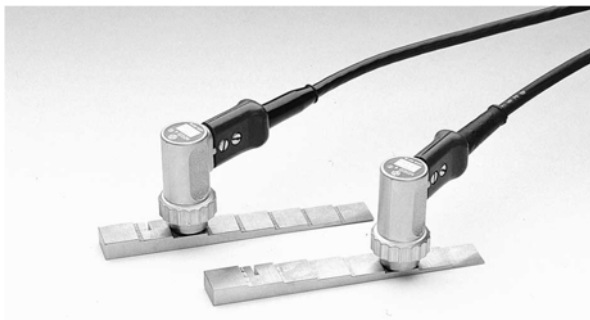
USK7D: Äänitien mittaus

5.1.2 Sääto kaksoisnormaaliluotaimella

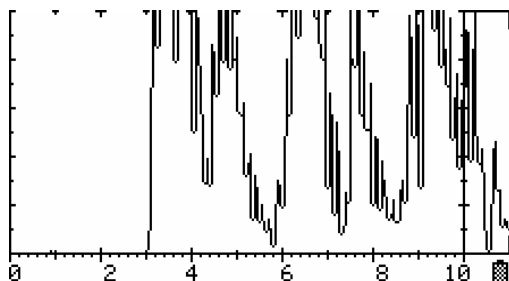
Kaksoisluotaimen säätö on rakenteellisista syistä johtuen vain rajoitetusti mahdollista takaseinäkaikujonon avulla. Pienestä luotaimen kulmasta (kuva 35) johtuen syntyy kaksoisluotaimilla poikittaisaaltoa, joka aiheuttaa häiriökaikuja ensimmäisen takaseinäkaibun jälkeen. Toinen takaseinäkaiku ei ole enää selvästi erotettavissa. Tästä syystä säätöön käytetään porraskappaletta. Sääto suoritetaan kahden eri paksuisen kappaleen avulla (2-pisteen säätö).

Esimerkki 3: Mitta-alue 10 mm terästä

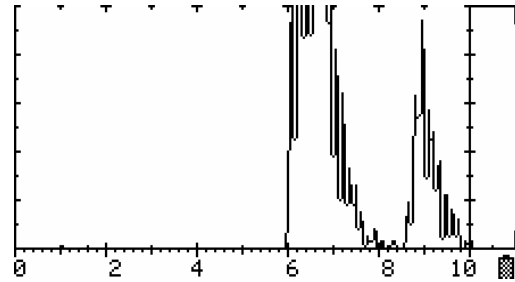
Porraskiilakappale VW (terästä: 1 - 8 mm): Mitta-alueen säätöön käytetään 3 ja 6 mm portaita. Portaat on valittava tarvittavan mitta-alueen perusteella. Kaiku 3 mm portaasta säädetään asteikon kohdalle 3 ja kaiku 6 mm portaasta säädetään asteikolla kohdalle 6, kuva 45 a, b ja c.



Kuva 45 a
Kaksoisluotain 3 ja 6 mm portailta



Kuva 45 b
Kaiku 3 mm portaalta



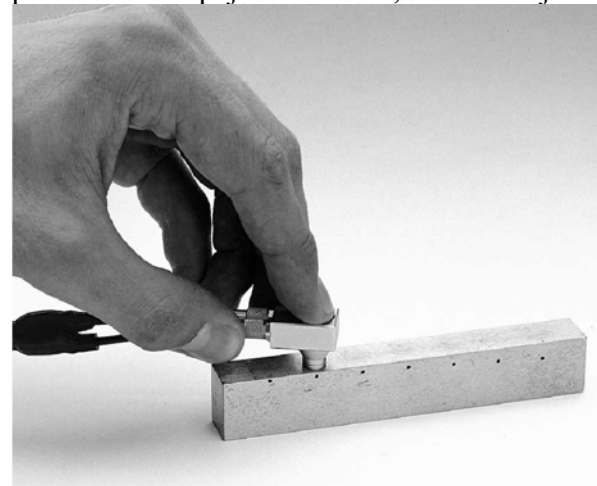
Kuva 45 c
Kaiku 6 mm portaalta

Sääto suoritetaan seuraavasti:

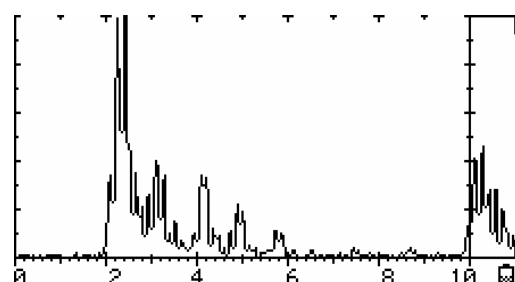
- Kaksoisluotain kytketään ensin 3 mm paksuiselle portaalte ja nolapisteen säädön avulla siirretään kaiun etureuna asteikon kohdalle 3.
- Luotain kytketään 6 mm portaalte ja mitta-alueen (äänennopeuden) säädön avulla siirretään kaiun etureuna asteikon kohdalle 6.

Kohtia a) ja b) toistetaan, kunnes kaikujen reunat ovat asteikon kohdilla 3 ja 6, kuva 45 b ja c.

Kaksoisluotaimella voidaan havaita hyvin lähellä pintaa olevia epäjatkovuuksia, kuva 46 a ja b.



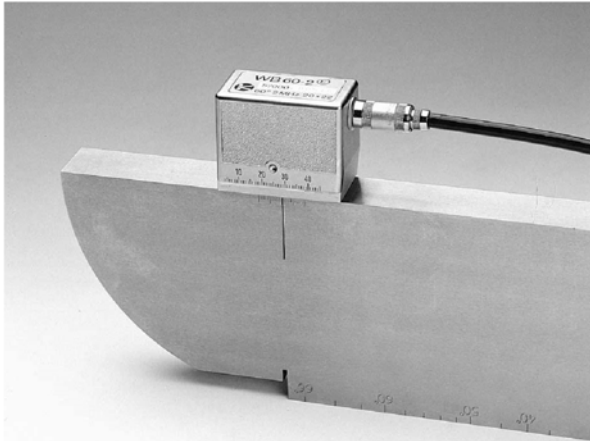
Kuva 46 a
DA312 luotain koekappaleella, jossa pinnan lähellä olevia heijastajia



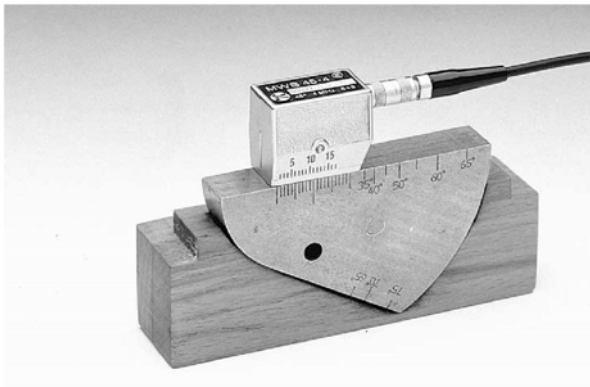
Kuva 46 b
Kaikukuvio pinnan lähellä olevasta heijastajasta

5.1.3 Sääto kulmaluotaimella

Kulmaluotaimien mitta-alueen säätöön käytetään lähes yksinomaan standardisoitua tarkistuskappaletta 1, kuva 47 a ja tarkistuskappaletta 2 (EN 27 963), kuva 47 b, koska tasomaisesta kappaleesta ei saada kulmaluotaimella kerrannaiskaikuja.

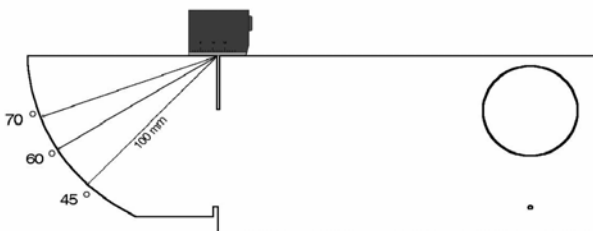


Kuva 47 a
WB60-2E kulmaluotain tarkistuskappaleella 1



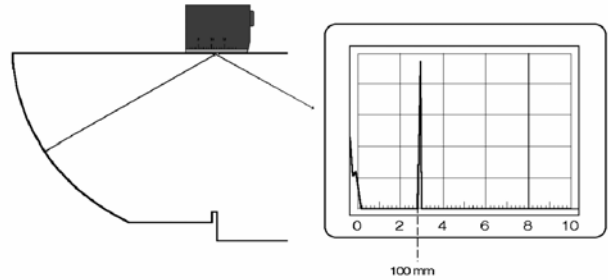
Kuva 47 b
MWB45-4E kulmaluotain tarkistuskappaleella 2

Tarkistuskappaleiden etuna on se, että niiden kaarista saadaan luotaimen kulmasta riippumatta aina kaiut samalla äänitiellä, kuva 48.

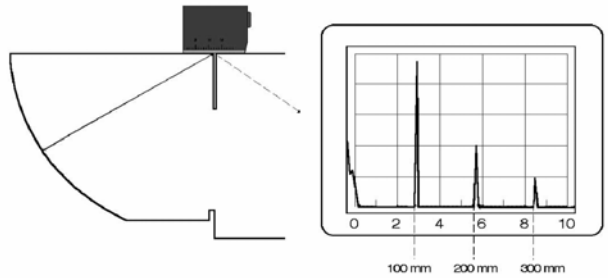


Kuva 48
Luotaus eri kulmilla tarkistuskappaleessa 1

Tarkistuskappaleesta 1 saadaan ensimmäinen kaiku 100 mm päästä, kun luotain on kaaren keski-pisteessä. Heijastuslain mukaisesti heijastuu kaarelta palaava ääni taaksepäin kytkentäpinnasta, kuva 49 a. Kaarelta ei saada toista kaikuja, jota tarvitaan mitta-alueen säätöön. Tästä huolehtivat kuitenkin kaaren keskipisteeseen tehdyt urat: Urien ja pinnan välisessä kulmassa tapahtuu nurkkaheijastus, jolloin ääni palaa takaisin kaarelle, kuva 49 b.

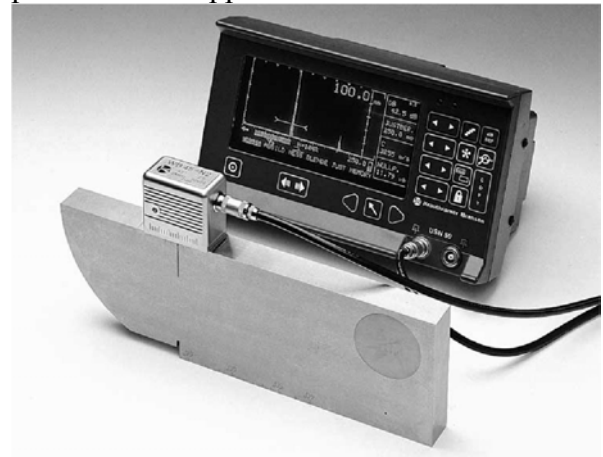


Kuva 49 a
Äänitie tarkistuskappaleessa 1 ilman uria



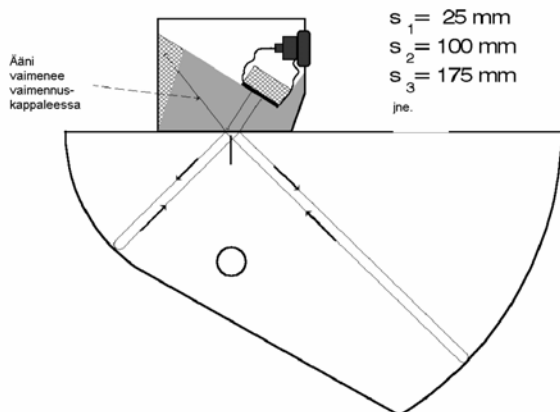
Kuva 49b
Äänitie tarkistuskappaleessa 1 urilla

Koska kaaren säde on 100 mm, saadaan toistokaiut 100 mm, 200 mm, 300 mm jne. päästä. Mitta-alue voidaan säätää siten samalla tavoin kuin normaaliluotaimella. Kuvassa 50 on esitetty mitta-alueen säätö 250 mm perusvertailukappaleen 1 avulla.



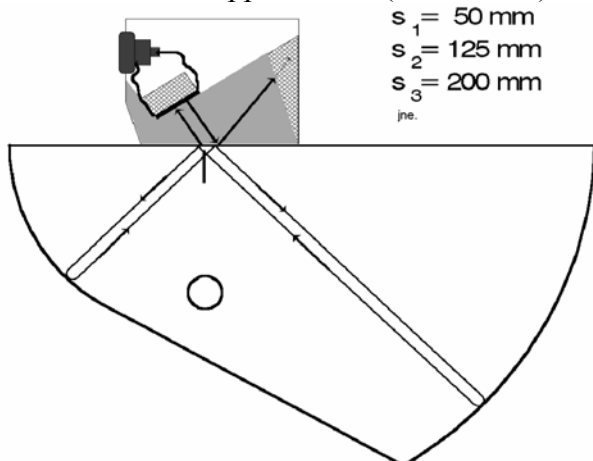
Kuva 50
Mitta-alue 250 mm WB45-2E luotaimella tarkistuskappaleen 1 avulla säädettynä

Pienoiskulmaluotaimilla käytetään mielellään huomattavasti pienempää ja ennen kaikkea kevyempää tarkistuskappaletta 2. Tässä kappaleessa on kaksi kaarta yhteisellä keskipisteellä. Tällöin ei sauria tarvita. Tarvittava kaikujono syntyy ääniaaltojen heijastuksista kaarien välillä, kuva 51 a ja b.



Kuva 51 a

Äänitiet vertailukappaleessa 2 ($R = 25 \text{ mm}$)

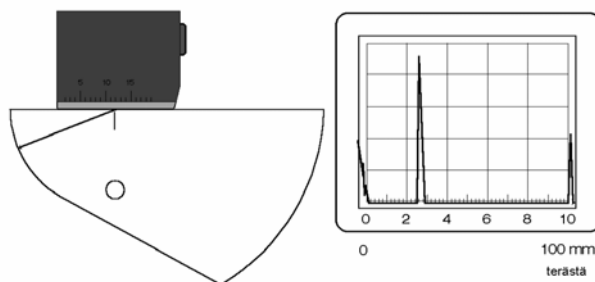


Kuva 51 b

Äänitiet vertailukappaleessa 2 ($R = 50 \text{ mm}$)

Riippuen siitä onko luotain kytketty 25 tai 50 mm kaarelle, saadaan erilainen kaikujono. ”Väärästä” suunnasta keskikohtaan tulevat ääniaallot eivät aiheuta kaikua kuvapinnalla. Ne vaimennetaan luotaimen vaimennuskappaleessa.

Kuvassa 52 on esitetty mitta-alueen säätö kulmaluotaimella 100 mm:ksi terästä käyttäen 25 mm kaarta perusvertailukappaleessa 2.

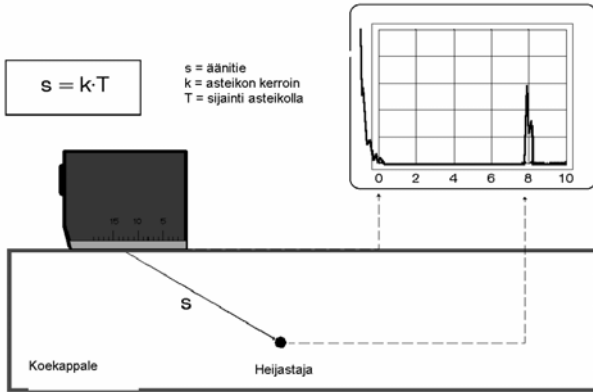


Kuva 52

Mitta-alueen säätö 100 mm tarkistuskappaleen 2 avulla

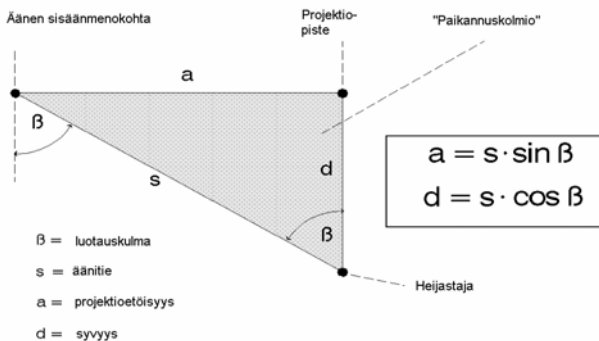
5.1.4 Paikantaminen kulmaluotaimella

Epäjatkuvuudesta kuvapinnalle tuleva kaiku ei kerro suoraan heijastajan sijaintia kappaleessa. Ainoa tieto heijastajan paikantamiseksi on kaiun sijainti kuvapinnalla eli äänitie s , siis etäisyys äänen sisääntulokohdasta epäjatkuvuuteen, kuva 53.



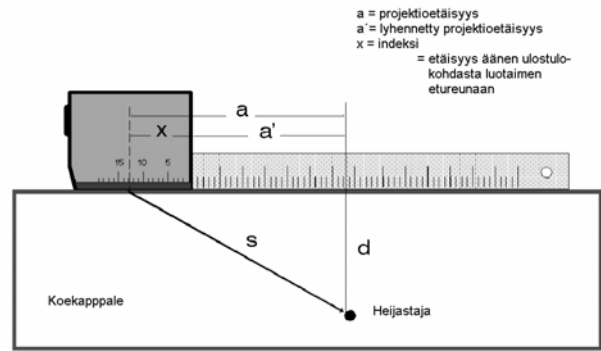
Kuva 53
Heijastajan paikantaminen kulmaluotaimella

Trigonometrian avulla voidaan kuitenkin ratkaista helposti ultraäänitarkastuksen kannalta tärkeät heijastajan **projektioetäisyys** ja **syvyys**, kuva 54 a.



Kuva 54 a
Vian paikantamiskolmio

Tällä tavoin on mahdollista välittömästi merkitä heijastajan paikka kappaleen pinnalla ja ilmoittaa sen syvyysijainti. Käytännön syistä voidaan käyttää myös **lyhennettyä projektioetäisyyttä**, joka mitataan luotaimen etureunasta. Lyhennetyn projektioetäisyyden ja projektioetäisyyden välinen ero on luotaimen **indeksi**, eli äänen ulostulokohdan ja luotaimen etureunan välinen etäisyys, kuva 54 b.



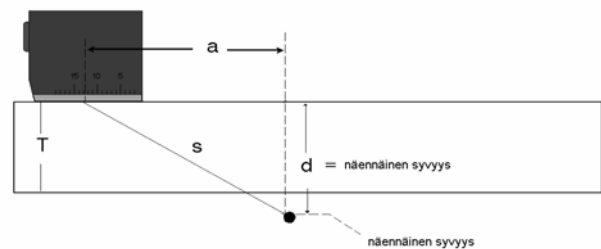
Kuva 54 b
Lyhennetty projektioetäisyys ja indeksi

Digitaalisissa ultraäänilaitteissa suorittaa laite itse nämä laskelmat ja näyttää tuloksen välittömästi, joten tarkastajan ei tarvitse enää suorittaa laskelmia, kuva 55.



Kuva 55
USN50: Luotaus MWB60-4E kulmaluotaimella

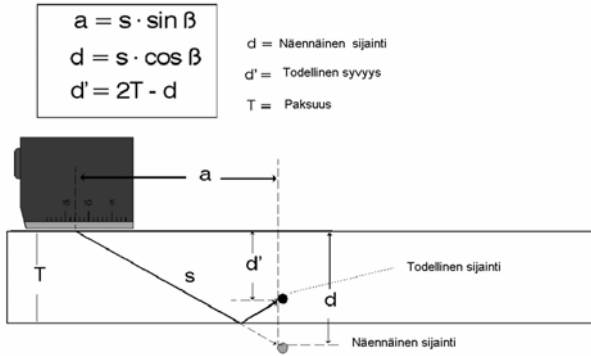
Eryityisesti hitsien tarkastuksessa tästä on suuri apu, koska siinä on otettava huomioon, onko ääni heijastunut jo kerran vastakkaiselta puolelta. Kolmion laskentakaavaa käyttäen saadaan heijastajalle näennäinen syvyys, joka on suurempi kuin kappaleen paksuus, kuva 56 a.



Kuva 56 a
Näennäinen syvyysijainti

Tarkastajan on pääteltävä, onko ääni heijastunut kerran kappaleen vastakkaiselta puolelta ja ottaa

se huomioon laskiessaan heijastajan syvyyssijaintia, kuva 56 b.



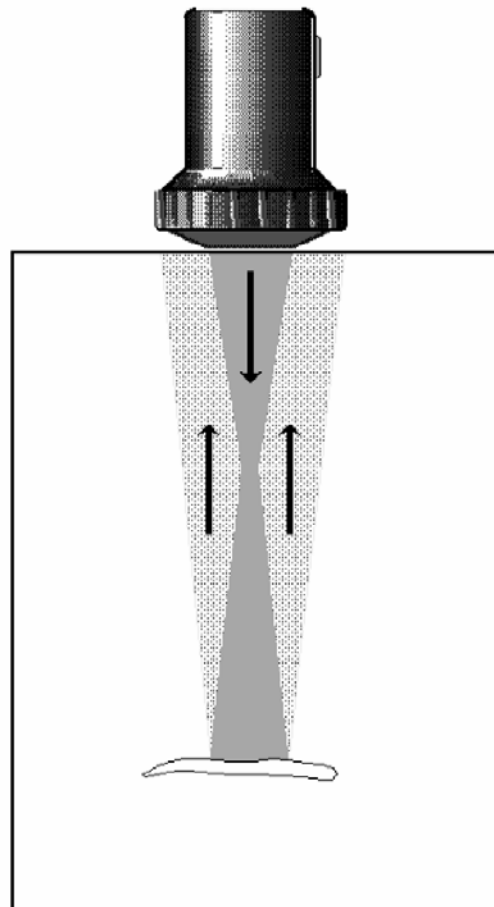
Kuva 56 b
Heijastajan todellinen syvyyssijainti

6. Epäjatkuvuuksien arvostelu

Epäjatkuvuus voidaan parhaimmin arvostella vasta sitten kun sen koko (laajuus) tunnetaan tarkasti. Siksi heijastajan todellisen koon mahdollisimman tarkka tunteminen on ymmärrettävästi tarkastajan toive. Juuri tätä tulosta odotetaan ainettarikkomattomalta tarkastukselta, kuten ultraääni-tarkastukselta. Koska ultraäänilaitteen kuvapinnalla on vain yksi kaiku, jota voidaan tulkita, on usein erittäin vaikeaa tai jopa mahdotonta antaa varmaa tietoa heijastajan koosta. Kaikilla arvostelumenetelmillä on kaiun korkeudella suuri merkitys.

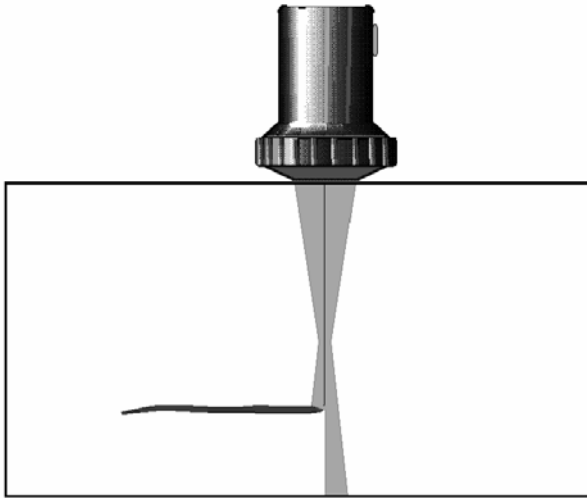
6.1 Koon määrittäminen äänikeilan reunan avulla

Heijastajan koon määrittämisessä päästään melko hyviin tuloksiin heijastajan ollessa äänikeilaa suurempi. Heijastaja heijastaa nimittäin kaiken äänen takaisin luotaimeen, kuva 57.



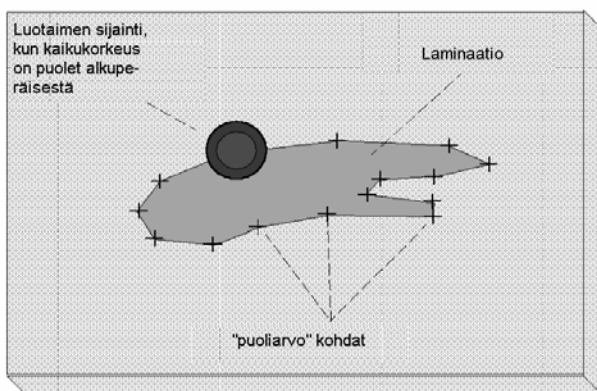
Kuva 57
Suuri heijastaja äänikeilassa

Kartoittamalla heijastajan reunat, saadaan hyvä kuva sen laajuudesta. Tarkastuksen aikana seurataan heijastajan kaiun korkeutta. Se kohta, jolla kaiun korkeus on tasan puolet maksimistaan, ilmaisee sen, että vain puolet keilasta osuu heijastajaan, kuva 58 a.



Kuva 58 a
Normaaliluotain heijastajan reunalla

Äänikeilan akseli on sillä hetkellä epäjatkuvuuden reunalla. Luotaimen paikka merkitään ja etsitään muut rajakohdat, kunnes merkit yhdistämällä epäjatkuvuuden koko on määritelty, kuva 58 b.



Kuva 58 b
Heijastajan koon määrittäminen reunojen avulla

Reunojen mittaus on sitä tarkempaa mitä pienempi äänikeilan halkaisija on epäjatkuvuuden kohdalla. Jos heijastajan laajuus on mitattava tarkasti, on valittava sellainen luotain, jonka lähikenttä on epäjatkuvuuden kohdalla. Erityisen sopivia tähän ovat kaksoisluotaimet, joiden äänikeila on kapea (1 - 3 mm).

6.2 Pienten epäjatkuvuuksien koon arviointi: AVG-menetelmä

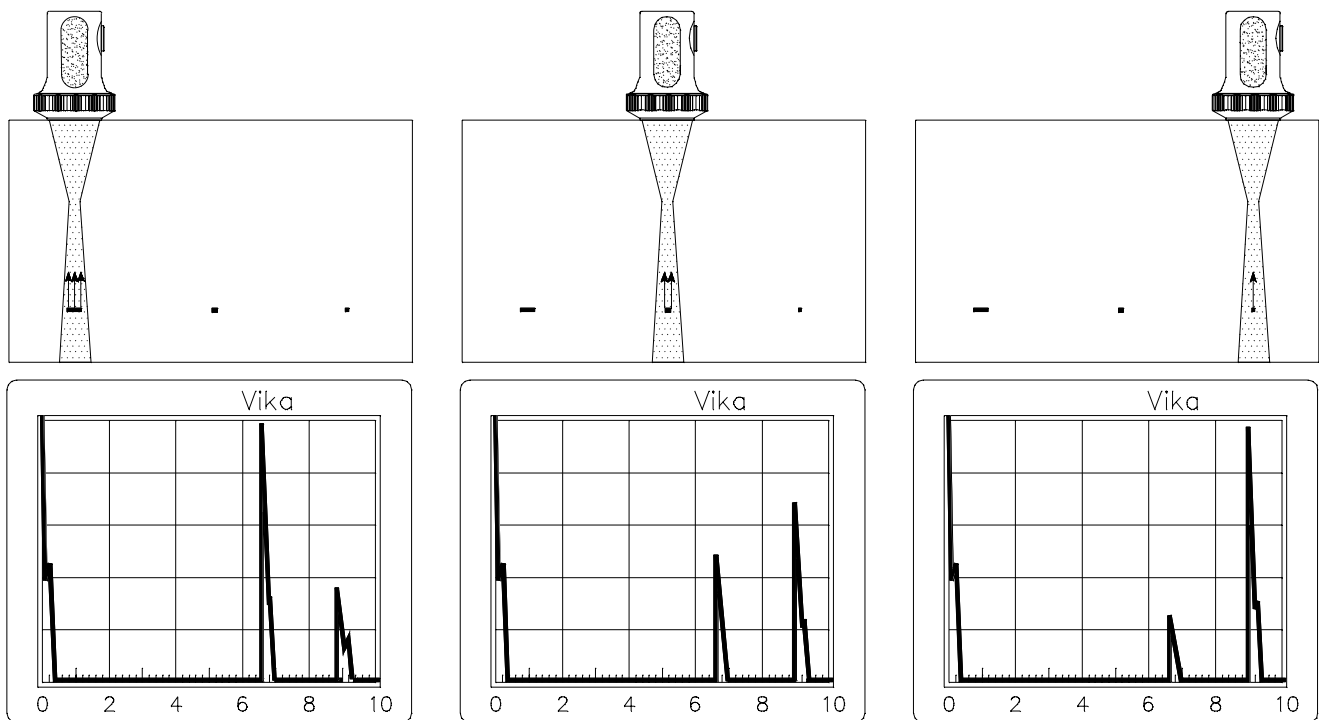
Kokonaan äänikeilan sisään jäävää heijastajaa kutsutaan **pieneksi heijastajaksi**. Jos tällaisella heijastajalla yritetään mitata heijastajan koko äänikeilan reunojen avulla, on tuloksena heijastajan koon sijasta suunnilleen äänikeilan koko. Rajojen mittauksessa ei ole tällaisessa tapauksessa mitään järkeä. Jo aiemmin on selvinnyt, että kaiun korkeus on sitä suurempi mitä suuremman alueen heijastaja peittää äänikeilasta. Tätä ominaisuutta voidaan käyttää hyväksi pienien heijastajien arvostelussa: Kaikukorkeus kasvaa heijastajan koon suurentuessa, kuva 59.

Optimiolosuhteissa, esimerkiksi samalla syvyydellä sijaitsevilla tasomaisilla porauksilla voidaan sanoa:

Kaikukorkeus on suhteessa heijastajan pinta-alaan, tai:

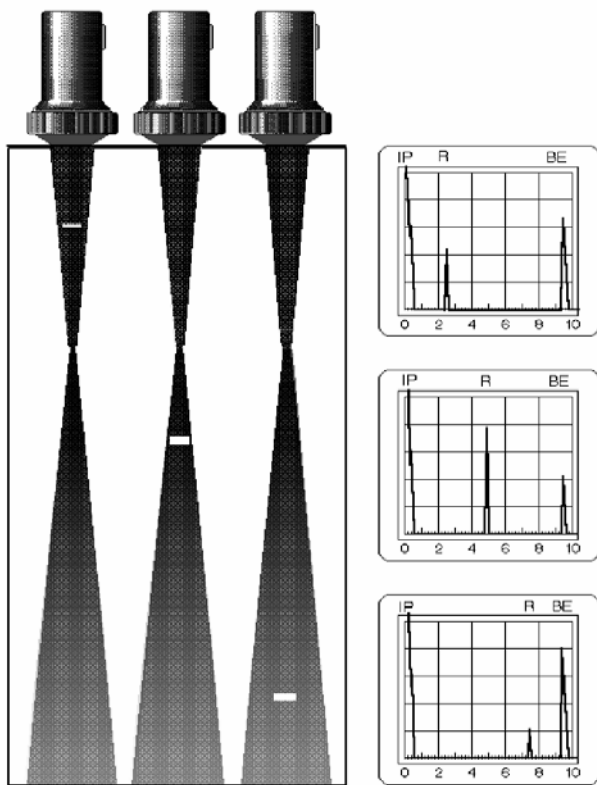
Kaikukorkeus on suhteessa heijastajan halkaisijan neliöön.

Esimerkki: Ø 2 mm porauksesta saadaan 4 kertaa korkeampi kaiku kuin Ø 1 mm porauksesta, koska sen pinta-ala on neljä kertaa suurempi.



Kuva 59
Erikokoisten heijastajien kaiut

Jos verrataan kahden eri etäisyyksillä olevan porauksen kaikua, saadaan lisäksi kaikukorkeuden etäisyytlaki selville, kuva 60.

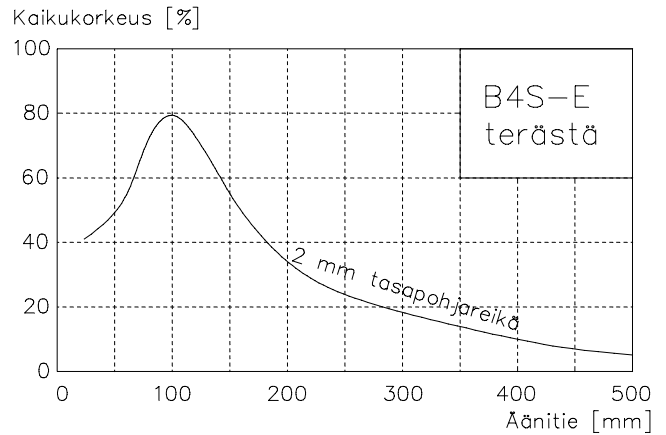


Kuva 60
Eri etäisyydellä olevien heijastajien kaiut

Eri etäisyyksillä olevien tasapohjaisten porausten avulla voidaan löytää ainakin kaukokentässä pätevä riippuvuus:

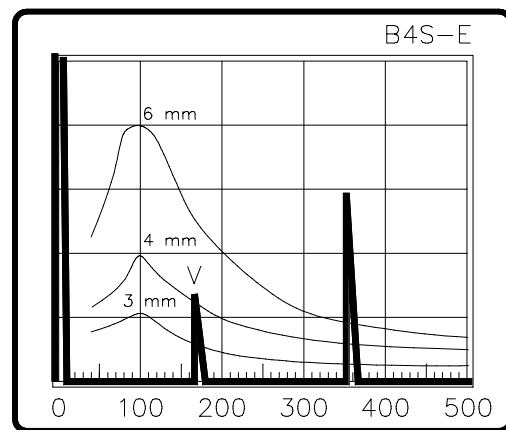
Kaikukorkeus pienenee kääntäen heijastajan etäisyyden neliöön.

Lähikentässä tämä ei enää päde! Kaikukorkeus on suurin äänikeilan fokuksessa ja pienenee etäisyyden tästä lyhentyessä, kuva 61.



Kuva 61
2 mm tasapohjareian kaikukorkeuskäyrä

Piirrettäessä tällaisia käyriä kuvapinnalle voidaan verrata todellisten vikojen kaikuja tunnettuihin tasapohjareikiin. Kuvassa 62 heijastaa epäjatkuvuus ääntä yhtä hyvin kuin 4 mm tasapohjareikä.



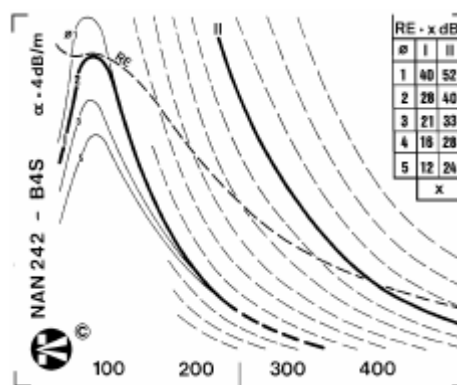
Kuva 62
Heijastajan (V) koon arviointi vertailukäyrillä

Koska vain epäjatkuvuuden heijastamaa ääntä arvostellaan, ei voida suoraan sanoa, että todellinen heijastajan koko on 4 mm. Siksi sitä sanotaan **vertailuvikakooksi**. Vain ideaalitapauksissa vastaa vertailuvikakoko heijastajan todellista kokoa. Tämä pätee vain silloin, kun heijastaja on tasomainen ja pyöreä ja on aivan kohtisuorassa äänikeilassa. Koska näin tuskin koskaan tapahtuu käytännössä, on epäjatkuvuuden todellinen koko aina suurempi kuin vertailuvikakoko. Lainalaisuutta ei vahinko kyllä voida tässä tapauksessa johtaa. Kaikukorkeus on suuresti riippuvainen epäjatkuvuuden ominaisuuksista, kuten sen muodosta, sen suunnasta äänikeilaan nähden ja sen pinnan laadusta.

Esimerkiksi 2 mm huokonen (pallomainen heijastaja) heijastaa vain 1 mm vertailuvikaa vastaten. Vastaavasti vinossa oleva 5 mm tasomaisesta viasta saadaan vertailuvika-kooksi 0 mm (ei havaittavissa) - 2 mm riippuen sen suunnasta. Tätä koon määrittämisen epätarkkuutta voidaan parantaa käyttämällä muita ultraäänitarkastuksen menetelmiä jo löydetyn epäjatkuvuuden tarkempaa arvostelua varten. Kokenut tarkastaja pystyy arvostelemaan epäjatkuvuudet melko tarkkaan. Hyvään tulokseen päästään luotaamalla eri suunnilta, seuraamalla kaiun muotoa ja sen muuttumista (**kaikudynamiikka**) luotainta siirrettäessä.

Huolimatta vikakoon määrittämisessä vielä olevista epätarkkuuksista on yllä kuvattu vikakoon määrittäminen käytössä laajalti, koska menetelmä perustuu äänikeilan todistettuihin lainalaisuuksiin. Se on siksi **toistettavissa** eli arvostelutulokset ovat tarkastuslaitteistosta ja tarkastajasta riippumattomia.

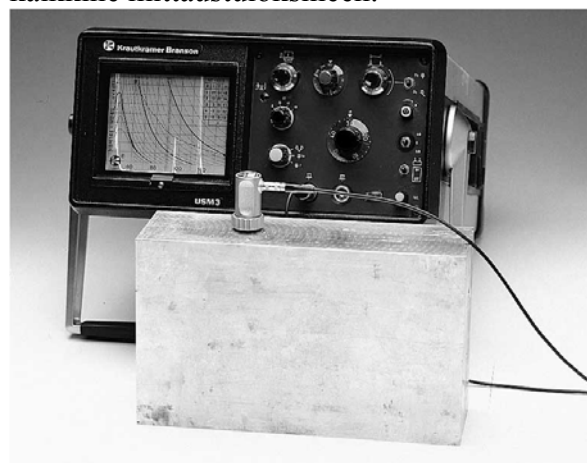
AVG-asteikkoja on saatavana erilaisille luotaimille ja mitta-alueille. AVG on lyhenne sanoista Etäisyys (Abstand), Vahvistus (Verstärkung) ja Koko (Grösse). Uusimmissa asteikoissa on otettu huomioon nykyiset tarkastusohjeet: Jos kappaleelle, jonka käyttö ja siten rasitukset tunnetaan, on suoritettava ultraäänitarkastus, on ensin määriteltävä minkä kokoisia vikoja sallitaan. Tämä voidaan tehdä esimerkiksi murtumismekaniikan avulla. Vikojen sijainnilla ja niiden esiintymistiheydellä on tietysti merkitystä. Jos sallittu vikakoko on määriteltä, kerrotaan tämä arvo vielä varmuuskertoimella ultraäänitarkastuksen arvostelun epävarmuuden huomioimiseksi. Ultraäänitarkastuksessa on merkitystä vain tätä vikakokoa vastaavalla vertailukäyrällä. Tarkastusta suoritettaessa tarvitsee rekisteröidä vain ne näyttämät, jotka ylittävät tämän rekisteröintikäyrän, kuva 63.



Kuva 63

B4S-E luotaimen AVG-asteikko

Tästä syystä arvosteluun tarvitaan vain yksi käyrä. Koska eri tarkastuksiin käytetään erilaisia rekisteröintikäyriä, on oltava mahdollista muuttaa tämä käyrä eri kokoisille vertailuvioille. Asteikon oikeassa ylänurkassa olevaa ruudukkoa käytetään tähän: Lähtötilanteena on laitteen perusvahvistus, johon lisätään haluttuun rekisteröintikokoon kuuluva lisävahvistus taulukosta. Oikean mittaasteikon kanssa voidaan tarkastus aloittaa. Jos kappaleesta saadaan rekisteröintikäyrän ylittävä kaiku, on tämä kirjattava ja arvosteltava. Tarkastusohjeissa on normaalisti annettu eri vaihtoehtoja: hylkäys, korjaus tai tarkempi tutkimus epäjatkuvuuden määrittämiseksi. Kuvassa 64 on esitetty taekappaleen tarkastus. Rekisteröintikäyrä vastaa 3 mm vertailuvikakokoa. Havaittu epäjatkuvuus 110 mm syvyydellä ylittää rekisteröintikäyrän, eli siitä on tehtävä merkintä tarkastusraporttiin kaikkine mittaustuloksineen.



Kuva 64

Vikakoon arviointi AVG-asteikon avulla

6.3 Vaimennus

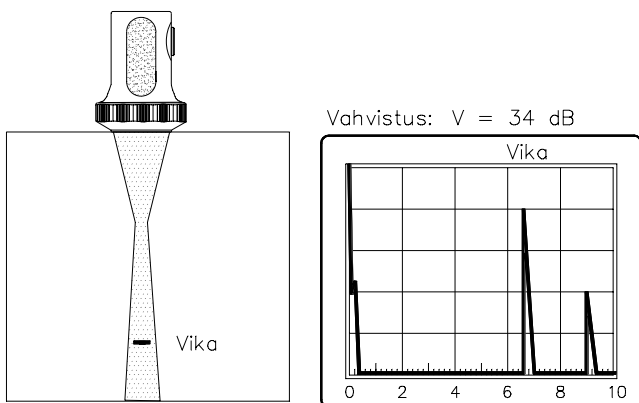
Äänikeilassa olevien tasapohjaisen heijastajan lainalaisuuksien (etäisyys ja suuruus) lisäksi on huomioitava myös eräs ominaisuus: äänen **vaimennus**. Äänen vaimennus johtuu materiaalin ominaisuuksista, ja on voimakkaasti riippuvainen taajuudesta ja käytetystä aaltoliikkeestä. Vasta kun vaimennus on tarkasti tiedossa, voidaan se ottaa huomioon vian koon arvioinnissa. Joka tapauksessa arvostelu tulee vaikeammaksi, aikaa vievämmäksi ja epävarmemmaksi, niin että AVG-menetelmän käytössä voi olla suuret toleranssit.

6.4 Vertailukappalemenetelmä

Tämän menetelmän avulla voidaan arvostelun epätarkkuuksia pienentää, kun käytössä on **vertailukappale**. Se on valmistettu samasta materiaalista kuin tarkastuskohde ja siihen on tehty vertailuheijastajia, joiden kaiuja voidaan verrata suoraan kappaleessa saataviin kaiuihin. Vertailu-kappalemenetelmää käytetään kahdella eri tavalla:

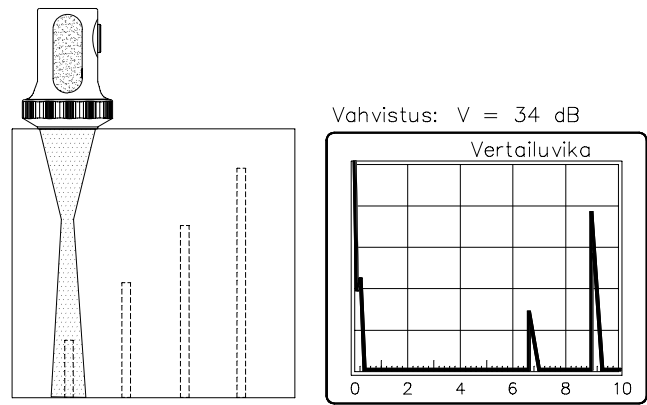
6.4.1 Kaikukorkeusvertailu

Tarkastus tapahtuu suurella vahvistuksella, jolloin pienimmätkin epäjatkuvuudet tulevat havaituiksi. Havaitun kaiun maksimi etsitään ja kaiun korkeus säädetään tietylle korkeudelle esim. 80 % kuva-pinnan korkeudesta (vertailukorkeus) vahvistimen avulla, kuva 65.



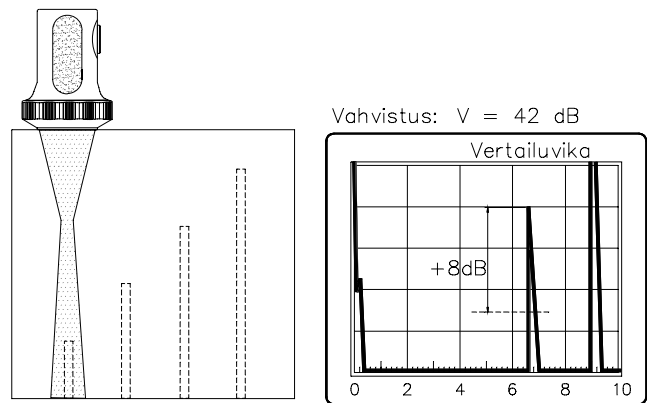
Kuva 65
Vikakaiku: Korkeus 80 % kuvapinnan korkeudesta (vertailukorkeus)

Samalla vahvistuksen arvolla etsitään vertailukappaleesta mahdollisimman lähellä samaa etäisyyttä oleva heijastaja, kuva 66.



Kuva 66
Vertailukappale: Vertailukaiun korkeus 30 %

Vertailuarvo on nyt se vahvistuksen ero, joka on epäjatkuvuuden ja vertailuvian välillä, kun niiden korkeus on sama, kuva 67.



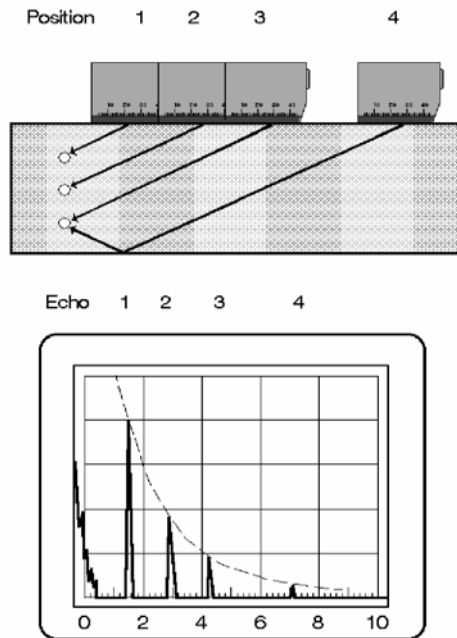
Kuva 67
Vertailukappale: Vertailukaiku vertailukorkeudella

Tulos: Epäjatkuvuudesta saatava kaiku on 8 dB suurempi kuin vertailukaiku, koska vahvistusta oli lisättävä 8 dB (42 dB - 34 dB), jotta kaiut olisivat yhtä korkeita kuvapinnalla.

Normaalisti rekisteröintitaso on sama kuin vertailuheijastajan koko, joka on määriteltävä jo ennen tarkastuksen aloitusta, samoin kuin AVG-menetelmässäkin.

6.4.2 Etäisyys-amplitudi-käyrä (DAC)

Kaikki heijastajat luodataan ennen tarkastuksen aloittamista ja saatujen kaikujen maksimit merkitään kuvapinnalle ja yhdistetään käyräksi, kuva 68.



Kuva 68
Vertailukappaleen poraukset ja niiden kaiut

Tätä käyrää kutsutaan **DAC-käyräksi (Distance-Amplitude-Curve)**. Kun tarkastuskohteesta saadaan kaiku epäjatkuvuudesta, havaitaan välittömästi, ylittääkö se DAC-käyrän vai ei. Vahvistuksen muutoksen avulla voidaan mitata montako dB:tä kaiku ylittää DAC-käyrän. Tämä **rekisteröintitason ylitys** on toistettava mittaustulos epäjatkuvuuden arvostelua ja raportointia varten.

DAC-käyrän etuna on:

1. Tarkastuksen aikana ei tarvitse verrata epäjatkuvuudesta saatavan kaiun korkeutta vertailukappaleessa olevan heijastajan kaikuun. Arvostelu suoritetaan suoraan DAC-käyrään.
2. Usein painavia ja suuria vertailukappaleita ei tarvitse siirtää tarkastuspaikalle.
3. DAC-käyrän teko irrotettavalle asteikolle tai ultraäänilaitteen muistiin on tarpeellista vain kerran tiettyä tarkastusta varten.

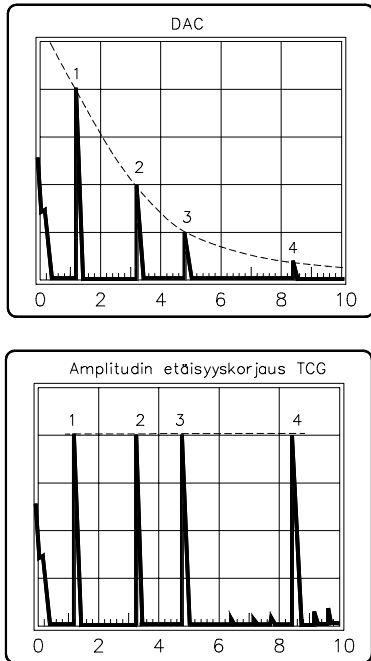
Tallennettaessa DAC-käyrä tarkastuskohdetta vastaavassa materiaalissa otetaan jo huomioon kaikki vaikutukset (etäisyyslaki, vaimennus ja siir-tohäviöt). Korjauksia ei tarvitse tehdä. Vian koon arvioinnissa on kuitenkin otettava huomioon samat asiat kuin AVG-menetelmässä eli heijastajan ominaisuudet (muoto, suuntaisuus ja pinnan-laatu). Tästä syystä vertailukappale menetelmällä suoritettuun tarkastukseen sisältyvät samat epätarkkuudet kuin AVG-menetelmään.

Jommankumman menetelmän suosiminen on subjektiivista. Yleensä kansallisissa ohjeissa on määritelty vian koon mittaumenetelmä, jolloin tarkastaja ei itse voi tehdä päätöksiä menetelmän käytöstä. Jos ohjeita ei ole olemassa, on arvioitava kumpi menetelmä on tarkoituksenmukaisin:

Ensimmäiseksi on selvitettävä, onko sopivia vertailukappaleita saatavilla. Jos niitä on jo olemassa, on luonnollinen valinta vertailukappalemenetelmä. Jos kappaleita ei ole, voidaan käyttää AVG-menetelmää, tai vertailukappaleet on valmistettava.

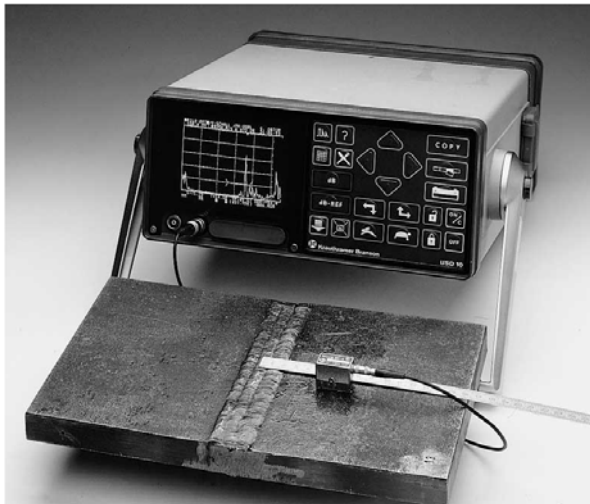
Useimmissa tapauksissa on AVG-menetelmän käyttö yhtä helposti sovellettavissa vähän seostetusta teräksestä valmistetuille kohteille, jotka ovat yksinkertaisia muodoltaan ja joiden vaimennus on pieni ja pinnan laatu on hyvä. Tarkastus on suoritettava kapeakaistaisella luotaimella, jonka taajuus on 1 - 6 MHz ja josta on saatavana AVG-käyrä tai AVG-asteikko.

Uusimmissa laitteissa on ohjelmoitava DAC-käyrän rekisteröinti. Lisäksi niissä voi olla etäisyydestä riippuva vahvistuksen korjaus, jota kutsutaan amplitudin etäisyyskorjaukseksi (TCG tai DAC-korjaus), kuva 69.

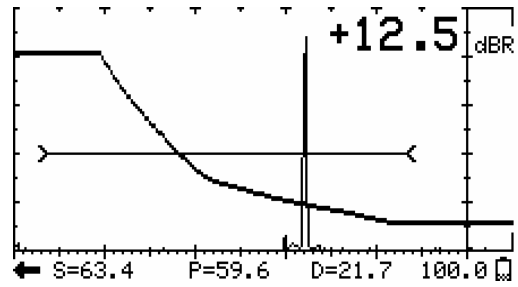


Kuva 69
DAC vertailukaiut (yllä) ja amplitudin etäisyyskorjaus (TCG, alla)

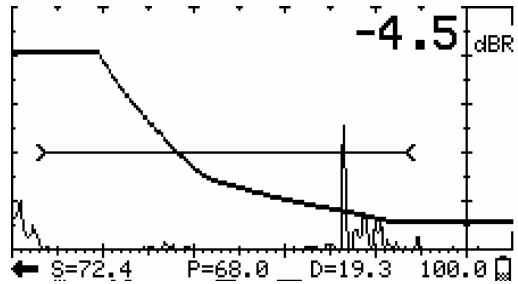
Rekisteröintikäyrä muuttuu vaakalinjaksi. Tällöin voidaan monitorin porttia käyttää valo- tai ääni hälytyksen antamiseen (vikahälytys), kuva 70 a - c. Lisäksi saadaan mittaustulokset epäjatkuvuuksien paikantamiseksi sekä amplitudiero dB:nä (dB_R arvo kuvassa).



Kuva 70 a
Hitsin tarkastus USD10 ultraäänilaitteella



Kuva 70b
Rekisteröitävä kaiku



Kuva 70 c
Kaiku, jota ei tarvitse rekisteröidä

DAC käyrä ja säädöt voidaan tallentaa ultraäänilaitteen muistiin. Tällä tavoin varmistetaan siitä, että seuraavat tarkastukset suoritetaan täysin samoilla säädöillä. Tallennettaessa epäjatkuvuuden A-kuva ja senhetkiset laitteen säädöt on tarkastajalla käytettävissä kaikki mahdollinen tieto myöhemmin valmistettavaa tarkastusraporttia varten.

7. Dokumentointi

Mitä suurempi tarkastuskohteen arvo on tai mitä tärkeämpi kohde on turvallisuuden kannalta, sitä tärkeämpänä pidetään ultraäänitarkastuksen dokumentointia. Dokumentin olisi ensinnäkin ilmaistava, että tarkastus on tehty kokonaan ja että se on oikein suoritettu. Lisäksi sen on mahdollistettava uusintatarkastuksen suorittaminen samoilla säädöillä (tarkastuksen toistettavuus).

Ultraäänitarkastuksen dokumentti eli **tarkastusraportti** koostuu karkeasti kolmesta osasta:

- Tiedot tarkastuskohteesta ja tarkastusmenetelmästä.
- Tiedot tarkastuslaitteistosta
- Tarkastuksen tulos:
Normaalisti taulukon muodossa kaikki havaitut ja arvostellut epäjatkuvuudet. Mahdollisesti myös tarkastuskohteesta piirros, johon vikojen paikat on merkitty.

Tiedot on kerättävä jo tarkastuksen aikana, erityisesti tiedot havaituista epäjatkuvuuksista. Lopullisen tarkastusraportin valmistelu voi tapahtua jossakin muualla, esim. toimistossa. Tarkastusraporttiin kuuluviin piirroksiin liittyvät laskelmat on tarkastajan tehtävä raporttia valmistelleessaan. Tarkastusraportin valmisteluun kuluu yleensä yhtä paljon aikaa kuin itse tarkastuksen suoritukseen ja se on otettava huomioon tarkastuksen laajuutta suunniteltaessa. Erityisesti suurilla tietomäärillä on jo siirto- tai laskuvirheiden mahdollisuus olemassa.

Tarkastajan työn helpottamiseksi uusimissa ultraäänilaitteissa ovat säätöarvojen ja tarkastuksen aikana tallennettavien tulosten tallennus- ja tiedonsiirtomahdollisuudet niin paljon paremmat, että tarkastaja voi keskittyä todelliseen tarkastustehtävään. Tallentamalla epäjatkuvuuden tiedot ultraäänilaitteen muistiin voidaan siirtovirheet välttää. Kirjattaessa epäjatkuvuuden sijainnit laitteen muistiin sisältyvät ne A-kuvan kanssa tieto-sarjaan. Tarvittaessa tarkastusraportti voidaan tulostaa kirjoittimen avulla, kuva 71.

JOB-NAME	TEST-LOC	OPERATOR	SET DATE
SD-218	LONDON	SMITH	28-08-93
OBJECT	DIS.WDTH	X-COORD.	DEF.LGTH
TANK D3	150.8 MM	157.8 MM	16.00 MM
POSITION	PROBE	Y-COORD.	SCAN-DIR
SEK. B9	MWB-70-4	2.000 MM	110
MATERIAL	SOUNDVEL	CON.FLAW	CHOICE-#
ST-52	03250 M/S	ROOT	2

Kuva 71
Tarkastusraportin pohja ultraäänilaitteessa

Tiettyyn tarkastustehtävään soveltuva tarkastusraportti voidaan tehdä PC:n avulla. Mittaustietojen käsittely on yhtä monipuolista kuin ne ohjelmat, joita on saatavana. Mahdollisimman monipuolisen tiedonsiirron varmistamiseksi käytetään digitaalisten ultraäänilaitteiden kanssa ”utility”- ohjelmia. Ne ovat helppokäyttöisiä ohjelmia, joiden avulla varmistetaan PC:n ja ultraäänilaitteen välinen tiedonsiirto.

Kaikki ultraäänilaitteen säädöt (tietosarjat), siihen kuuluvat säätöarvot (toimintoarvot) ja näyttämät (A-kuvat) voidaan tallentaa levykkeelle tai kovalevyllä. Tekstitiedot voidaan tallentaa ASCII-muodossa ja A-kuvat grafiikkamuodossa (PCX, IMG). Tietosarja vastaa laitteen kaikkia säätöjä ja se tallennetaan heksadesimaalimuodossa. Tällä tavoin varmistetaan, että tietojen takaisin lähettäminen laitteelle on varmaa ja arvot ovat täysin samat. Teksti- ja grafiikkatiedot ovat käyttäjän käytettävissä. Niitä voidaan sopivan tekstinkäsittely- tai grafiikkaohjelman avulla käyttää tarkastusraportteihin. Oheinen raportti on esimerkki ohjelman avulla tehdystä hitsin tarkastuksesta. Tarkastus on tehty digitaalisesti ultraäänilaitteella ja havaitut viat on tallennettu laitteelle ja siirretty sen jälkeen PC:lle. Sopivan ohjelman avulla on tietoja käsitelty ja tulostettu lopulta tarkastusraportti.

8. Näyttämien tulkinta

Edellä käsiteltyjen tarkastajan tehtävien vastakohtana ei näyttämien arviointi perustu pelkästään mittaustuloksiin. Lisätoimena on kaikuja merkityksen arviointi. Tämän merkityksen ymmärtäminen vaatii monivuotista käytännön tarkastuskokemusta ja myös ultraäänitarkastuksen tulosten vertaamista muilla menetelmillä saatuihin tuloksiin erilaisissa kohteissa. Näytön analysointiin käytettävät laitteet ja menetelmät, kuten signaalianalysaattorit eivät kuulu tämän ”johdatus ultraäänitarkastukseen” -kirjaseen piiriin. Tätä varten on olemassa suuri määrä muita kirjoja ja julkaisuja ammattilehdissä, joihin kannattaa tutustua.

Lähteet:

M. Berke, U. Hoppenkamps:
"Einführung in die Ultraschallprüfung"
Krautkrämer Schulungssystem Teil 1 / Level 1
3. Aufgabe (1990)

M. Berke, U. Hoppenkamps:
"Bewertung von Ungängen"
Krautkrämer Schulungssystem Teil 2
3. Aufgabe (1991)

M. Berke, U. Hoppenkamps:
"Praktikum mit digitalen Ultraschallgeräten"
Krautkrämer Schulungssystem Teil 4
3. Aufgabe (1992)

M. Berke:
"Wanddickenmessung mit Ultraschall"
Krautkrämer Schulungssystem Teil 5
2. Aufgabe (1992)

H.-W. Corsepius:
"Einführung in die Grundlagen"
Sonderdruck 218, (1990)
Krautkrämer GmbH & Co.

Alkuperäisteos:

M. Berke:
"Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung mit
Ultraschall Einführung in die Grundlagen"
Sonderdruck 218, (1993)
Krautkrämer GmbH & Co.



Sonar Oy, PL 5, Taivalmäki 11, 02201 Espoo
Puh. (09) 542 5420, Fax (09) 4522 523
etunimi.sukunimi@sonar.fi, www.sonar.fi
Y-tunnus 0200791-9, Kotipaikka Espoo