



Mikko Kauppinen

Ratakiskon elinkaari

Mikko Kauppinen

Ratakiskon elinkaari

Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 1/2011

Liikennevirasto

Helsinki 2011

Kannen kuvat: Mikko Kauppinen

Verkojulkaisu pdf (www.liikennevirasto.fi)

ISSN-L 1798-6656

ISSN 1798-6664

ISBN 978-952-255-611-0

Liikennevirasto

PL 33

00521 HELSINKI

Puhelin 020 637 373

Mikko Kauppinen: Ratakiskon elinkaari. Liikennevirasto, Väylätekniikkaosasto. Helsinki 2011. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 1/2011. 113 sivua. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-255-611-0.

Avainsanat: Ratakisko, kiskoviat, ainetta rikkomaton tarkastus, kiskonhionta

Tiivistelmä

Tässä työssä tarkastellaan kiskon elinkaaren eri osa-alueita ja niiden vaikutusta kiskon käyttöikäen. Työn tavoitteena on antaa lukijalle peruskäsitys kiskon elinkaaren eri vaiheista ja niihin liittyvistä tekijöistä. Työ on tehty kirjallisuuden, asiantuntija-haastattelujen ja ratakäyntien pohjalta. Tietyissä kohdissa on kirjallisuuden lisäksi analysoitu Suomen rautateistä saatuja tilastoja, kuten kiskovikatilastoja.

Kiskon elinkaari alkaa teräksen valmistuksesta. Teräksestä valetaan kiskoaihiot, joista kiskot valssataan. Nykyisin rakennettavissa junaradoissa käytetään pääasiassa jatkuvakiskoraiteita eli niissä kiskot on hitsattu jopa kilometrejä pitkiksi kokonaisuuksiksi. Jatkosten hitsaukseen käytetään nykyisin lähinnä termiitti- tai leimuhitsausmenetelmää.

Raiteeseen asennettuun kiskoon kohdistuu sekä ympäristöstä että liikenteestä rasituksia, jotka voivat johtaa kiskon vikaantumiseen. Se, muodostuuko kiskoon vikoja ja millaisia muodostuvat viat ovat, riippuu muun muassa kiskon, radan ja liikenteen ominaisuuksista. Muuttuneet olosuhteet voivat johtaa sellaisten vikojen syntymiseen, joita kyseisellä radalla ei ole ennen havaittu. Esimerkiksi vierintäväsäymissäröjen olemassaolo Suomen rataverkolla on tiedostettu vasta muutaman viime vuoden aikana.

Vikojen havaitsemiseksi kiskoja tarkastetaan. Nykyisin kiskojen tarkastukseen käytetään pääasiassa ultraäänitarkastusta. Kiskojen kunnon ylläpitämiseksi ja havaittujen vikojen poistamiseksi kiskoille tehdään kiskonhiontaa sekä korjausta, kuten kaaripäällehitsausta. Kun kiskot ovat saapuneet käyttöikänsä päähän, vaihdetaan ne uusiin. Käytetyt kiskot on mahdollista ottaa uudelleen käyttöön toissijaisilla, vähemmän liikennöidyillä raiteilla.

Mikko Kauppinen: Livscykeln hos en järnvägsskena. Trafikverket, Infrastrukturteknik. Helsingfors 2011. Trafikverkets undersökningar och utredningar 1/2011. 113 sidor. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-255-611-0.

Nyckelord: Räls, fel på järnvägsskenor, oförstörande prov, rälsslipning

Sammanfattning

I det här arbetet granskas olika delområden i en järnvägsskenas livscykel och hur de inverkar på skenans livslängd. Syftet med arbetet är att ge läsaren en basuppfattning om de olika faserna i skenans livscykel och de faktorer som anknyter till dem. Arbetet har gjorts på basis av litteratur, intervjuer med sakkunniga och besök på järnvägar. I vissa avsnitt har förutom litteraturstudier även analyserats statistik gällande Finlands järnvägar, såsom statistik över fel på järnvägsskenor.

Järnvägsskenans livslängd inleds med framställningen av stålet. Av stålet gjuter man förformar som sedan valsas ut till skenor. I de järnvägar som byggs nuförtiden används främst helsvetsade skenor, d.v.s. skenorna har svetsats ihop till flera kilometer långa helheter. Vid svetsningen av delarna används nuförtiden närmast termit- eller brännsvetsningsmetod.

När järnvägsskenan monterats på spåret utsätts den för belastningar både av miljön och av trafiken, vilket kan leda till att skenan drabbas av fel. Att skenorna kan få fel och hurdana fel som uppstår beror bland annat på egenskaper hos skenan eller banan eller i trafiken. Förändrade förhållanden kan leda till att det uppstår sådana fel som inte tidigare iakttagits på i fråga varande bana. Att det förekommer bristningar på grund av rullkontaktsutmattning är till exempel något som man blivit medveten om först under de senaste åren.

Skenorna granskas för att man ska upptäcka felen. Nuförtiden används främst ultraljudundersökning vid granskningen. För att hålla skenorna i skick och undanröja fel utför man skenslipning samt reparationer, såsom bågpåsvetsning. När skenorna nått slutet av sin livslängd byts de ut mot nya. Använda skenor kan tas i återanvändning på andra rangens, mindre trafikerade järnvägsspår.

Mikko Kauppinen: Rail Life Cycle. Finnish Transport Agency, Infrastructure technology. Helsinki 2011. Research reports of the Finnish Transport Agency 1/2011. 113 pages. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-255-611-0.

Keywords: Rail, rail defects, nondestructive testing, rail grinding

Summary

This thesis is a study on different steps of the rail life cycle and their effect on the rail life. The goal of the thesis is to provide an overview of the rail life cycle and a basic understanding on how different factors affect it. This thesis is based on literature, specialist interviews and visits to the track. In addition, an analysis of various statistics of the Finnish railway network, such as rail defect statistics, is also included in some parts.

Rail life cycle begins with the manufacturing of steel. The steel is then cast into billets, which are rolled into rails. The tracks built today are mainly done with continuously welded rails. The rails are welded into continuous strands, which can be up to several kilometers long. The main welding techniques that are used nowadays are thermite and electric flash butt welding.

Both the environment and the traffic exert the rail in service, which finally leads to the deterioration of the rail. Whether a certain part of the rail becomes flawed and what kind of flaws appear in that rail, is dictated by various factors, such as the properties of the rail, track and traffic. A change in circumstances can lead to defects, which have not previously been present on that line. For example, the presence of rolling contact fatigue related flaws on Finnish rail network has been noticed for the first time during the last couple of years.

In order to detect the flaws, the rails are inspected. Nowadays, the most common inspection method is ultrasonic inspection. To maintain the good condition of the rails and to remove the defects in them, rail grinding and rail repair, such as resurfacing by arc welding, are done as maintenance procedures. When a rail has reached the end of its life, it is renewed. The rails that are removed from service, can be reused in secondary tracks that have less traffic.

Esipuhe

Tämä diplomityön on tehnyt tekniikan kandidaatti Mikko Kauppinen Tampereen teknillisen yliopiston rakennustekniikan laitoksella maa- ja pohjarakenteiden yksikössä. Työn tekoon liittyi tutustumisjakso Yhdysvalloissa, Coloradossa sijaitsevaan Transportation Technology Centerin (TTCI) tutkimuskeskukseen sekä TTCI:n asiantuntijoiden käyntejä Tampereen teknillisellä yliopistolla.

Työn ohjaajina ovat toimineet tekniikan tohtori Minnamari Vippola ja tekniikan tohtori Antti Nurmikolu Tampereen teknillisestä yliopistosta. Liikennevirastossa työtä on ohjannut yksikön päällikkö Tuomo Viitala. TTCI:ssä työssä avustivat John Tunna (PhD) ja Greg Garcia. Työn tarkastajina toimivat professori Toivo Lepistö ja professori Pauli Kolisoja Tampereen teknillisestä yliopistosta.

Helsingissä tammikuussa 2011

Liikennevirasto
Väylätekniikkaosasto

Sisällysluettelo

1	JOHDANTO	9
2	KISKON VALMISTUS	11
2.1	Teräksestä yleisesti.....	11
2.2	Kiskon valmistusmenetelmät.....	14
2.2.1	Teräksen valmistus	14
2.2.2	Kiskoaihoiden valu.....	15
2.2.3	Valssaus	17
2.2.4	Viimeistely.....	18
2.2.5	Hienoperlitisointi	19
2.2.6	Tarkastus	19
2.3	Teräslaadut.....	21
2.4	Valmistajat.....	23
2.5	Kiskoprofiilit.....	24
2.6	Valmistuspituudet	26
2.7	Jäännösjännitykset.....	26
2.8	Jatkoshitsaus kiskohitsaamalla	27
3	JATKUVAKISKORAITEEN RAKENTAMINEN	28
3.1	Käsittely	28
3.2	Asennus ja neutralointi	30
3.3	Jatkoshitsaus.....	32
3.3.1	Termiittijatkoshitsaus	33
3.3.2	Leimuhitsaus.....	36
3.3.3	Kaarijatkoshitsaus	37
3.4	Valmiin jatkoshitsin tarkastus	38
4	KISKOON KOHDISTUVAT RASITUKSET	39
5	KISKON VIKAANTUMINEN	42
5.1	Viat kiskon hamarassa.....	44
5.1.1	Ympäriyöntijäljet.....	44
5.1.2	Kulkupinnan lävistymä	46
5.1.3	Kuluneisuus.....	46
5.1.4	Korrugaatio	48
5.1.5	Pintaviat.....	50
5.1.6	Vierintäväsyminen	51
5.1.7	Squat	53
5.1.8	Hamaran sisäiset viat	54
5.2	Viat kiskon varressa	56
5.3	Viat kiskon jalassa.....	57
5.4	Viat hitseissä	58
5.4.1	Viat jatkoshitseissä.....	58
5.4.2	Viat päällehitseissä.....	60
5.5	Kiskojen vikaantuminen Suomessa	61
6	KISKON TARKASTUS	64
6.1	Menetelmät.....	64
6.1.1	Tunkeumanestetarkastus	64
6.1.2	Magneettijauh tarkastus.....	66

6.1.3	Ultraäänitarkastus.....	68
6.1.4	Pyörrevirtatarkastus	79
6.1.5	Induktio tarkastus	80
6.2	Tarkastustiheydet.....	80
6.3	Kiskojen tarkastus Suomessa.....	82
7	KISKON KUNNOSSAPITO	84
7.1	Kiskonhionta.....	84
7.1.1	Hionnan tavoitteet.....	84
7.1.2	Hionnan suoritus	87
7.1.3	Hiontastrategiat.....	90
7.1.4	Hiontakalusto	93
7.1.5	Kiskonhionta Suomessa.....	93
7.2	Kiskon korjaus.....	94
7.2.1	Suomessa käytössä olevat korjausmenetelmät.....	94
7.2.2	Vaihtoehtoiset korjausmenetelmät.....	96
7.3	Neutraalilämpötilan mittaaminen.....	97
8	KISKON UUSIMINEN	100
8.1	Uusimisen perusteet	100
8.2	Kiskojen uusiminen Suomessa	100
9	YHTEENVETO, PÄÄTELMÄT JA JATKOTUTKIMUSTARPEET	103
9.1	Yhteenveto ja päätelmät.....	103
9.2	Jatkotutkimustarpeet.....	105
	LÄHTEET	107

1 Johdanto

Tämä työ on tehty osana Tampereen teknillisen yliopiston Rakennustekniikan laitoksella meneillään olevaa tutkimusprojektia Elinkaaritehokas rata. Tutkimusprojektin tavoitteena on kasvattaa tietämystä radan eri osien elinkaarikustannuksista ja niihin vaikuttavista tekijöistä. Tämä työ keskittyy yksinomaan kiskon elinkaareen. Työ pyrkii kuvaamaan kiskon koko elinkaaren kiskoteräksen valmistuksesta kiskon uusimiseen. Työ keskittyy pääasiassa linjaraitteeseen ja siinä käytettävään kiskoon. Työ ei siis kata erikoisrakenteita, kuten vaihteita.

Työ on tehty suurimmaksi osaksi kirjallisuusselvityksenä. Kirjallisuuden lisäksi työssä on paikoin hyödynnetty asiantuntijahaastatteluja sekä kiskovikakohteisiin tehtyjen ratakäyntien antia. Työn tavoitteena on luoda lukijalle käsitys kiskon elinkaaren eri vaiheista ja niiden vaikutuksista kiskon käyttöikäen. Vikaantumisen, kunnossapidon ja uusimisen yhteydessä työssä on analysoitu saatavilla olleita, Suomen rautateitä koskevia tilastoja.

Kisko on rautatien tärkein yksittäinen komponentti. Sen tehtävänä on kantaa päällään kulkevan junan paino ja jakaa se alla oleville ratapölkkyille. Kantamisen lisäksi kisko toimii junan pyörille tasaisena kulkualustana ja ohjaa niiden kulkua.

Kiskon käyttöikä riippuu lukuisista tekijöistä. Luonnollisesti ensimmäinen merkittävä tekijä on kisko itse. Kiskoon käytetyllä teräslaadulla ja prosesseilla, joilla kisko valmistetaan voidaan vaikuttaa kiskon mekaanisiin ominaisuuksiin. Kiskon muotoilulla ja valmistuspituudella on niin ikään omat vaikutuksensa. Luvussa 2 kerrotaan teräksestä yleisesti, teräksen ja kiskojen valmistuksesta sekä kiskon ominaisuuksiin vaikuttavista tekijöistä, kuten teräslaaduista ja kiskoprofiileista.

Jotta tehtaalta tuleva valmis kisko saadaan toimitettua ehjänä työmaalle, on sitä käsiteltävä oikeaoppisesti ja huolellisesti. Mikäli käsittelyssä kiskoon syntyy esimerkiksi pintaruhjeita, voivat ne toimia kiskon käytön aikana jännityskeskittyminä ja helpottaa säröjen ydintymistä, siten lyhentäen kiskon käyttöikää. Niin ikään väärä asennus voi johtaa kiskon ennen aikaiseen vaurioitumiseen. Kisko on asennettava raitteeseen oikean pituisena, jotta tarpeettoman suurilta lämpöjännityksiltä välttyään. Samoin jatkoshitsaus on tehtävä huolella, kiskon ominaisuudet huomioon ottaen, jotta hitsin ominaisuudet poikkeavat mahdollisimman vähän peruskiskosta. Mikäli hitsausprosessissa tapahtuu virhe, esimerkiksi hitsiin jää kuonasulkeuma tai purseenpoisto tehdään huolimattomasti, syntyy jälleen jännityskeskittymä, joka johtaa lyhentyneeseen käyttöikäen. Nykyisin yleisimmin käytetyt jatkoshitsausmenetelmät ovat termiitti- ja leimuhitsaus. Luvussa 3 kerrotaan kiskon käsittelystä, asennuksesta ja jatkoshitsauksesta.

Käytön aikana jatkuvakiskoraitteeseen kohdistuu niin liikenteestä kuin ympäristöstäkin erilaisia rasituksia. Kiskoon kohdistuvia rasituksia käsitellään luvussa 4. Rasituksen tyypistä ja voimakkuudesta riippuen ne voivat johtaa kiskon vikaantumiseen. Kiskoon syntyvät viat ovat seurausta joko valmistusvirheistä, virheellisestä käsittelystä, asennuksesta tai käytöstä tai materiaalin väsymisestä. Se, muodostuuko kiskoon tiettyyn kohtaan vika ja minkälainen muodostuva vika on, riippuu useista tekijöistä, kuten kiskon, radan ja liikenteen ominaisuuksista. Erilaisia kiskoihin muodostuvia vikoja ja niiden ominaispiirteitä käsitellään luvussa 5.

Jotta kiskoon syntyneet viat eivät ehtisi aiheuttamaan liikenteelle haittaa, pyritään niitä havaitsemaan erilaisten tarkastusten avulla. Suomessa kiskojen tarkastus tehdään kävely- sekä ultraäänitarkastuksena. Tarkastusten tiheys riippuu muun muassa radan kunnossapitotasosta sekä liikennemääristä. Kiskojen tarkastukseen käytettyjä ainetta rikkomattomia tarkastusmenetelmiä, tarkastusten tiheyksiä sekä kiskojen tarkastusta Suomessa käsitellään luvussa 6.

Vikojen ennaltaehkäisemiseksi ja havaittujen vikojen korjaamiseksi kiskoja kunnossapidetään. Kiskojen kunnossapito pitää yleisesti sisällään kiskonhionnan ja kiskon korjauksen. Kiskoja on mahdollista hioa sekä ennaltaehkäisevästi että korjaavasti. Ennaltaehkäisevällä hionnalla pyritään pitämään kiskojen profiili hyvänä ja kiskon pinnalle muodostuvat viat poissa. Korjaavalla hionnalla pyritään pääasiassa poistamaan kiskon pintaan jo muodostuneita vikoja. Luvussa 7 kerrotaan kiskonhionnasta, kiskon korjauksesta sekä neutraalilämpötilan mittauksesta.

Kun kiskon kunto on laskenut tiettyjen kriteerien alapuolelle tai mikäli radan päällysrakenneluokkaa halutaan nostaa, kiskojen vaihto on ajankohtaista. Kiskojen vaihto on taloudellisinta tehdä yhdessä muiden radan komponenttien, kuten pölkkyjen ja sepelein uusimisen yhteydessä. Raiteesta poistettuja kiskoja on niiden kunnan salliessa myös mahdollista kierrättää käyttämällä niitä uudelleen toissijaisilla, vähemmän liikennöidyillä rataosuuksilla. Luvussa 8 kerrotaan kiskon uusimisen perusteista sekä uusimisesta Suomessa.

Luvussa 9 kootaan kiskon elinkaaren osa-alueet yhteen. Lisäksi siinä pohditaan mahdollisia jatkotutkimuskohteita.

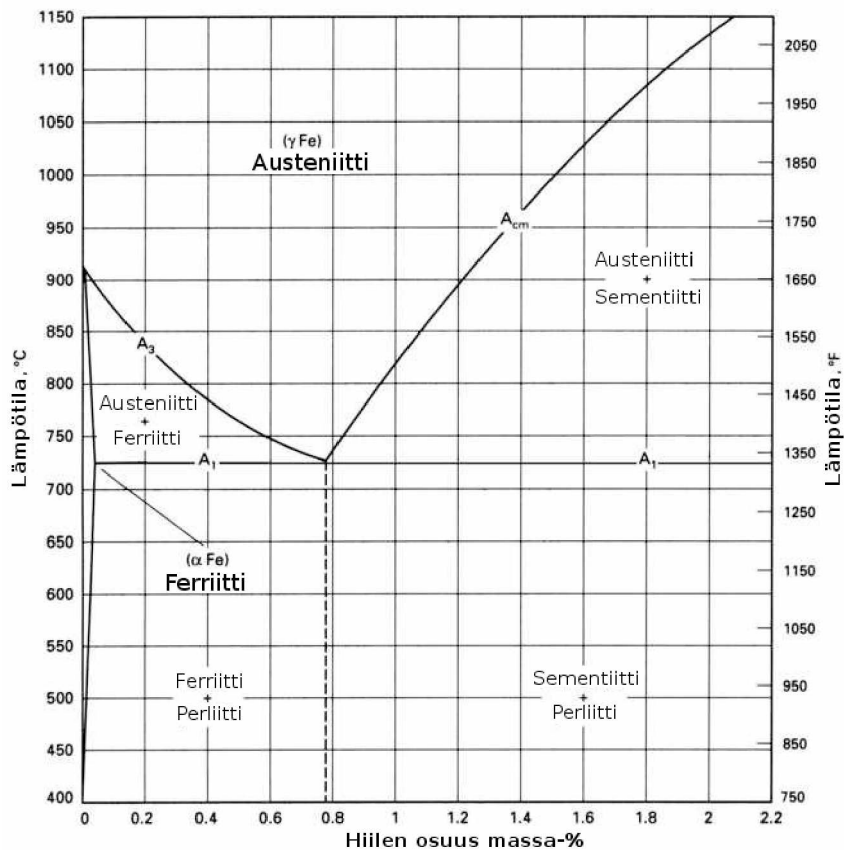
2 Kiskon valmistus

Ratakiskot valmistetaan teräksestä. Tästä syystä tämän luvun aluksi luodaan yleinen katsaus teräkseen; mitä se on ja mitkä seikat vaikuttavat sen ominaisuuksiin. Teräksen yleisen esittelyn jälkeen tutustutaan kiskojen valmistusprosessiin eli teräksen valmistukseen, valuun, valssaukseen, viimeistelyyn, mahdolliseen lämpökäsittelyyn sekä tarkastukseen. Valmistuksen jälkeen kerrotaan valmistajat, joiden kiskoja Suomessa käytetään, Euroopassa käytössä olevat kiskoteräslaadut, kiskoprofiilit ja valmistetut kiskopituudet. Kiskoon valmistuksen yhteydessä syntyvien jäännösjännitysten merkitykseen luodaan myös lyhyt katsaus. Luvun lopuksi kuvataan valssattujen kiskojen yhteenliittäminen kiskohitsaamalla leimuhitsausmenetelmällä.

2.1 Teräksestä yleisesti

Teräs on raudan ja hiilen seos, jossa hiiltä on alle 2,11 %. Rautaseoksia, joiden hiilipitoisuus on yli 2,11 % kutsutaan valuraudoiksi. [1] Hiilen lisäksi teräkseen voidaan seostaa muita seosaineita, kuten mangaania ja piitä. Seosaineilla pyritään vaikuttamaan teräksen mikrorakenteeseen ja mekaanisiin ominaisuuksiin, kuten lujuuteen, kovuuteen ja sitkeyteen.

Rauta-hiili-tasapainopiirroksista (Kuva 1) voidaan päätellä millainen mikrorakenne puhtaan raudan ja hiilen seoksella on lämpötilasta ja hiilipitoisuudesta riippuen. Seostus vaikuttaa eri mikrorakenteiden esiintymislämpötiloihin, mutta puhtaalle rauta-hiili-seokselle laadittu tasapainopiirros pitää paikkansa hyvin vielä 5 – 6 % seosainepitoisilla seoksilla. [2]



Kuva 1 Rauta-hiilitasapainopiirros [3].

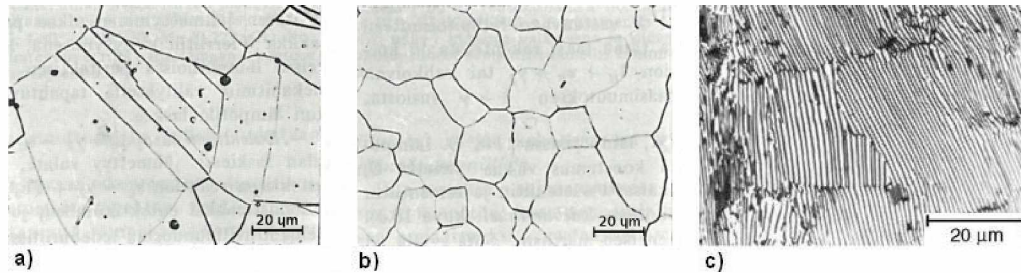
Puhdas rauta on mikrorakenteeltaan huoneenlämpötilassa ferriittiä. **Ferriitti** on pehmeää, sitkeää ja hyvin muokkautuvaa. Kun puhdasta rautaa kuumennetaan, muuttuu sen mikrorakenne 911 °C lämpötilassa austeniitiksi. Austeniitti kykenee liuottamaan itseensä huomattavasti ferriittiä suurempia määriä hiiltä. **Austeniittia** ei esiinny huoneenlämpötilassa ilman voimakasta seostusta tai erityisiä lämpökäsittelyjä, eikä se ole tavallisten kiskojen kannalta merkittävä mikrorakenne¹. [2]

Kun austeniittinen rauta-hiili-seos, jossa on yli 0,05 % hiiltä, jäädytetään, hajaantuu se ferriitin ja perliitin seokseksi. **Perliitti** on ferriitin ja sementiitin muodostama rakenne, jossa sementiitti on ohuina lamelleina ferriittimatriisissa. Sementiitti on hyvin kova ja hauras hiilen ja raudan muodostama rautakarbidi (Fe₃C). Perliitti on näin ferriittiä lujempaa, mutta vähemmän muokkautuvaa. Perliitin mekaaniset ominaisuudet ovat sitä paremmat, mitä pienempi sen raekoko ja sementiittilamellien väliset etäisyydet ovat. Näihin voidaan vaikuttaa muun muassa kasvattamalla jäähtymisnopeutta. [1, 4]

Kun teräksen hiilipitoisuus on 0,77 %, hajaantuu se jäähtyessään täysin perliittiseksi. Yli 0,77 % hiilipitoisuuksilla rakenteeseen muodostuu perliitin ohelle kovaa ja erittäin haurasta raerajasementiittiä. Tällöin teräs on hyvin haurasta, eikä sovellu käytettäväksi ilman sopivia lämpökäsittelyjä. Austeniitin hajaantumiseen voidaan vaikuttaa

¹ Mikrorakenteeltaan austeniittisestä Hadfieldin mangaaniteräksestä (Mn-pitoisuus 10 – 14 % [1]) valmistetaan rautatievaihteiden risteyskiä. Tavallisia kiskoja siitä ei kuitenkaan valmisteta.

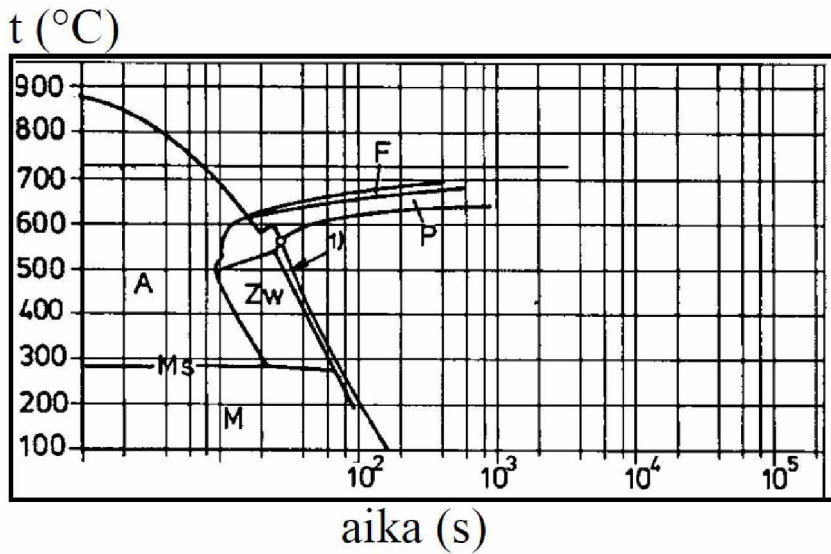
jäähtymisnopeuden avulla, jonka ansiosta teräksille, joiden hiilipitoisuus poikkeaa hieman 0,77 %:sta, on mahdollista saada täysin perliittinen mikrorakenne. Kuvassa 2 on esitetty austeniitin, ferriitin ja perliitin mikrorakenteet. [1, 4]



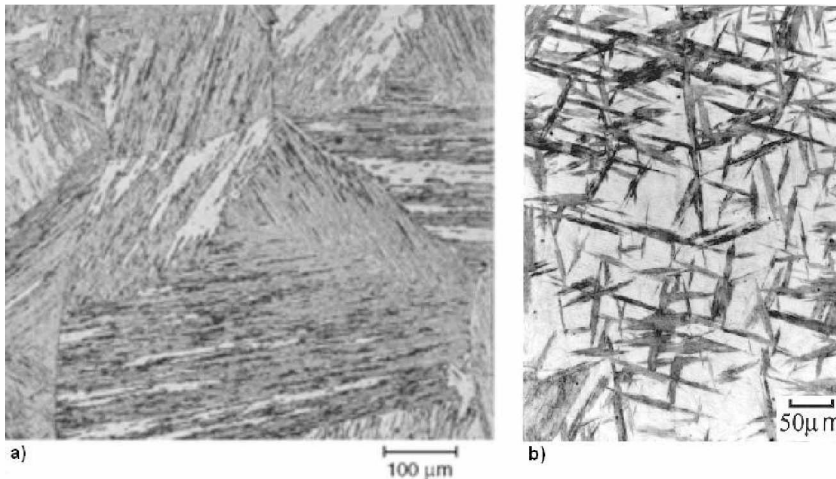
Kuva 2 Optiset mikroskooppikuvat a) austeniitin [muokattu [1]] b) ferriitin [muokattu [1]] ja c) perliitin [6] mikrorakenteista.

Edellä esitetyt mikrorakenteet, ferriitti ja perliitti, ovat tasapainorakenteita, jotka muodostuvat hitaalla jäähtymisnopeudella. Kun jäähtymisnopeutta kasvatetaan riittävästi, voidaan austeniitin hajaantuminen näiksi tasapainorakenteiksi estää. Kuvassa 3 on esitetty teräslaadun UIC 700 S-käyrä, jonka avulla voidaan päätellä kyseiselle teräslaadulle eri jäähtymisnopeuksilla saavutettavat mikrorakenteet. Riittävän suurilla jäähtymisnopeuksilla, jäähtymisnopeudesta ja teräksen koostumuksesta riippuen, mikrorakenteeksi voi muodostua bainiittia, martensiittia tai jäännösausteniittia. **Bainiitti** on perliitin tapaan ferriitin ja sementiitin seos, mutta siinä sementiitti on hienojakoisempaa ferriitin seassa. Bainiittisella rakenteella on mahdollista saavuttaa perliittiä paremmat mekaaniset ominaisuudet. Bainiitista on kehitetty myös karbidittomia seoksia, joissa ei esiinny sementiittiä. **Martensiitti** on hiiliylikäylysteistä ferriittiä, jota muodostuu suurilla jäähtymisnopeuksilla. Pakkotilassa olevan hiilen johdosta se on kova ja hauras rakenne. Kuvassa 4 on esitetty martensiitin ja bainiitin mikrorakenteet. **Jäännösausteniitti** on rakenteeseen jäänyttä muuttumatonta austeniittia, jota esiintyy lähinnä martensiitin tai bainiitin ohella. [1, 4]

Ratakiskoihin käytettävä teräs sisältää nykyisin raudan lisäksi teräslaadusta riippuen pääasiassa 0,6 – 0,8 % hiiltä, 0,8 – 1,2 % mangaania sekä 0,15 – 0,6 % piitä. Mikrorakenteeltaan kiskoteräkset ovat perliittiä. Perliittisellä mikrorakenteella saavutetaan nykyisin rautatiekäyttöön optimaalisin lujuuden, kovuuden ja sitkeyden yhdistelmä.



Kuva 3 Teräslaadun UIC 700 S-käyrä. [7].



Kuva 4 Optiset mikroskooppikuvat a) martensiitin [6] ja b) bainiitin mikrorakenteista [8].

2.2 Kiskon valmistusmenetelmät

2.2.1 Teräksen valmistus

Suurin osa maailman teräksestä valmistetaan rautamalmita. Rautamalmit sisältää rautamineraaleja, kuten magnetiittia (Fe_3O_4) ja hematitiittia (Fe_2O_3), sekä sivukivimineraaleja. Malmit rikastetaan, jolloin rautamineraalit erotetaan sivukivimineraaleista ja malmin rautapitoisuus saadaan korotettua jatkoprosessien kannalta riittävälle tasolle. Koska rikastejauhe ei sellaisenaan sovi raudanvalmistukseen, valmistetaan siitä muutaman senttimetrin kokoisia kiinteitä kappaleita, sintteriä tai pellettejä. Sintteri valmistetaan yleisesti terästehtaalla. Pelletit vuorostaan valmistetaan usein jo kaivoksella. [2]

Sintteristä ja pelleteistä valmistetaan masuunissa eli jatkuvatoimisessa kuilu-uunissa raakarautaa. Rautamineraaleista peräisin olevat rautaoksidit pelkistyvät metalliseksi

raudaksi lämmön ja pelkistimien, kuten hiilen ja vedyn, avulla. Masuunista saatava raakaraudan hiilipitoisuus on 4 – 5 %. Lisäksi se sisältää enemmän epäpuhtauksia, kuin teräksen sallitaan sisältävän. Hiilipitoisuuden laskemiseksi raakarautaa mellotetaan konvertterissa, joka on sylinterimäinen reaktioastia. Mellotuksessa sulaan rautaan puhalletaan happea, joka reagoi hiilen kanssa muodostaen hiilimonoksidia. Aiemmin mellotukseen on käytetty ilmaa, jonka seurauksena saadun teräksen tyypipitoisuus jäi korkeaksi. Hiilen ohella mellotuksessa hapettuu myös mangaania, piitä ja hieman rautaa. Sulaan lisätään raakaraudan lisäksi kierrätysterästä, jolla estetään prosessin ylikuumenemista, sekä poltettua kalkkia, joka muodostaa sulan pinnalle oksidien kanssa kuonan. Kuona pidetään riittävän kalkkimäärän avulla emäksisenä, jolloin haitalliset epäpuhtaudet, kuten rikki ja fosfori, siirtyvät tehokkaammin sulasta siihen. [2]

Terästä valmistetaan rautamalmin ohella myös kierrätysteräksestä. Kierrätysteräs sulatetaan valokaariuunissa sähkön tuottaman lämmön avulla. Sulatuksen lisäksi teräs mellotetaan valokaariuunissa. [2]

Mellotettu teräs siirretään senkkään eli valusankoon, jossa sille tehdään jatkokäsittelyjä. Yksinkertaisimmillaan jatkokäsittelyt ovat teräksen seostus ja tasaisen lämpötilan varmistus onnistuneen valun takaamiseksi. [2] Seostuksessa sulaan lisätään happea sitovia aineita, kuten mangaania ja piitä, jotka muodostavat sulan pinnalle kuonan nousevia mangaani- ja piioksidisulkeumia. Jos happea ei poistettaisi sulasta, se muodostaisi raudan kanssa rautaoksidisulkeumia, jotka heikentävät teräksen mekaanisia ominaisuuksia huomattavasti. [1] Myös alumiinia on käytetty hapen poistamiseksi, tosin nykyisin sitä käytetään enää harvoin [9]. Alumiinin ja hapen muodostamat alumiinioksidisulkeumat toimivat kiskoissa tehokkaina särönydintäjinä ja heikentävät siten kiskon väsymisen kestävyyttä [10]. Mangaania lisätään teräkseen myös rikin sitomiseksi. Jos rikkiä ei sidota, aiheuttaa se teräksessä kuumahaurautta. Mangaani muodostaa rikin kanssa helposti muokkautuvia mangaanisulfidisulkeumia. [1]

Standardin EN13674-1 [11] mukaan kiskoteräs on valmistettava joko LD-prosessia eli emäksisen kuonan muodostavaa happimellotusta tai valokaariuunia käyttäen. Valokaariuunissa teräs valmistetaan kierrätysteräksestä sulattamalla.

Kiskoteräksille on standardin EN13674-1 [11] mukaan tehtävä senkkauunikäsittelyjä ja tyhjiökaasunpoisto. Tyhjiökaasunpoistolla poistetaan teräkseen liuenneita kaasuja, pääasiassa vetyä. Korkean vetypitoisuuden johdosta teräkseen voi muodostua vetyläikkiä, jotka sisäisinä säröinä toimivat jännityskeskittyminä [1]. Senkkauunikäsittelyssä varmistetaan sulan oikea lämpötila, sekoitetaan sulaa sekä poistetaan epämetalliset sulkeumat. Senkkauuni on rakenteeltaan pienitehoinen valokaariuuni. [2]

2.2.2 Kiskoaihoiden valu

Kiskot on perinteisesti valmistettu valannevaletuista aihioista. Merkittävä osa Suomen rataverkolla olevista kiskoista on valannevaletuista aihioista valmistettuja. Nykyisin, valmistettaessa kiskot standardin EN13674-1 [11] mukaisesti, valannevalua ei saa enää käyttää. Valannevalussa sula teräs kaadetaan muottiin, jossa teräksen annetaan jähmettyä. Valumuotti on pystyasennossa oleva, tulenkestävällä materiaalilla vuorattu astia, jonka halkaisija on esimerkiksi 650 x 750 mm ja korkeus 2100 mm [12]. Kuvassa 5 on esitetty nousuvaluna tehtävä valannevalu. Valun jälkeen valanne poistetaan muotista ja siirretään kuoppauuniin, jossa sitä pidetään noin 800 – 1100 °C lämpötilassa kunnes koko valanne on saavuttanut tasaisen lämpötilan. Tämän jälkeen

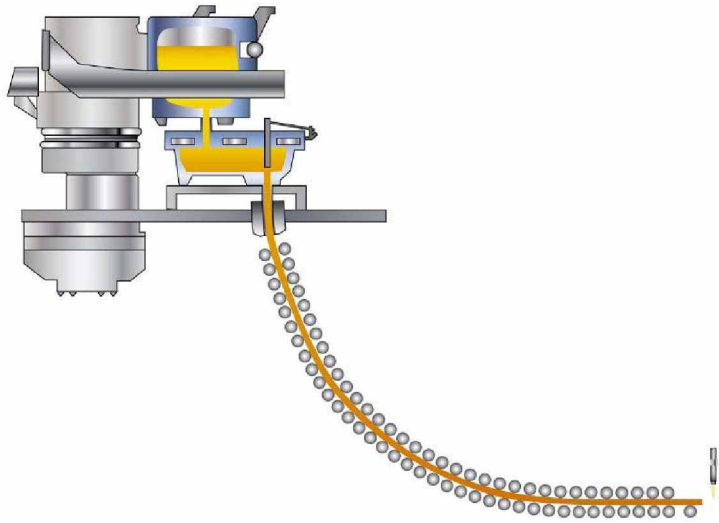
valanne valssataan 6 – 25 pistolla eli valssauskerralla karkeavalssaimella, jolloin valanteen poikkileikkaus pienenee voimakkaasti ja lopputuloksena on pitkä aihio. Aihion poikkileikkaus voi olla esimerkiksi 200 x 200 mm neliö. [14]



Kuva 5 Valanteiden valu nousuvaluna [13].

Hayn [14] mukaan valannevalulla on tiettyjä huonoja puolia. Ensinnäkin, koska valanteen jähmettyminen alkaa reunoilta, tapahtuu siellä ensimmäisenä kutistumista, jonka kompensoimiseksi sisemmissä osissa oleva sula siirtyy reunoille jättäen jälkeensä onkalon. Tämä onkalo ei välttämättä hitsaudu valssauksen aikana umpeen, jonka seurauksena kiskon sisälle jää pitkittäinen virhe. Jotta tältä välttyään, joudutaan valanteesta leikkaamaan noin 20 – 30 % yläosasta pois. Onkalon syntyä voidaan vähentää hitaalla jäähtymisellä, josta kuitenkin seuraa toinen ongelma: lisääntynyt epäpuhtauksien ja seosaineiden, kuten fosforin, rikin ja hiilen suotautuminen valanteen yläosaan. Epäpuhtauksien ja seosaineiden epätasaisen jakautumisen seurauksena lopullisen tuotteen ominaisuudet muuttuvat paikallisen koostumuksen mukana. Kolmas ongelma valannevalussa on mahdollinen kaasun aiheuttama huokoisuus, jota voidaan ehkäistä antamalla valettavan sulan seisoa senkassa ennen valua tai lisäämällä seokseen kaasuja sitovia seosaineita.

Valannevalun korvaajaksi kiskojen aihioiden valmistukseen on tullut jatkuvavalu (Kuva 6). Isossa-Britanniassa jatkuvavaletusta teräksestä valssattuja kiskoja alettiin käyttää vuonna 1974 [15]. Standardin EN13674-1 [11] mukaan kiskot on nykyään valssattava jatkuvavaletuista aihioista. Jatkuvavalussa teräs valetaan vesijäähdytteisen kuparikokillin eli valumuotin läpi, jossa ainoastaan aihion pintakerros jähmettyy. Kuparikokilli oskilloi valun aikana, jotta valettava aihio ei tartu kokilliin kiinni. Aihion homogeenisuus varmistetaan kokillin perään sijoitetulla elektromagneettisella sekoittajalla, joka sekoittaa aihion sisällä yhä sulassa tilassa olevaa terästä. Aihion lopullinen jähmettyminen tapahtuu kontrolloidusti vesi- tai sumusuihkujen avulla, jonka jälkeen aihio oikaistaan ja leikataan halutun pituisiin osiin. [16] Valettujen aihioiden poikkileikkaus voi valumuotista riippuen olla neliö, suorakulmio tai ympyrä. Esimerkiksi Thyssen valmistaa suorakulmion muotoisia aihioita, joiden poikkileikkauksen mitat ovat 265 x 385 mm [17]. Valetun teräksen homogeenisemmän koostumuksen lisäksi jatkuvavalulla saavutetaan valannevalua parempi saanto ja taloudellisuus [16].



Kuva 6 Jatkuvavalukone [13].

2.2.3 Valssaus

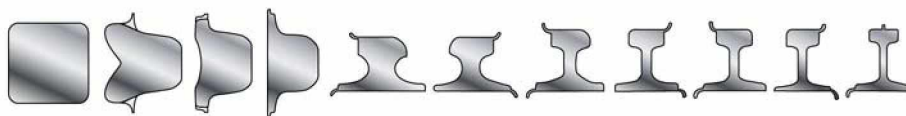
Valssauksella tarkoitetaan aihoiden mekaanista muokkausta valssaimen avulla. Kuvassa 7 on esitetty esimerkki valssauksesta. Kun valssauksella pyritään suuriin muodonmuutoksiin, tehdään muokkaus kuumavalssauksena. Kuumavalssauksessa teräksen lämpötila on yli 900 °C, jolloin se on helposti muokattavaa. Kuumamuokkauksen aikana teräksen mikrorakenne tasoittuu ja hienontuu. Valssaus tapahtuu yleensä usean peräkkäisen valssin sarjana, joiden aikana valmistettavan kappaleen muotoa muutetaan vähitellen. [2]



Kuva 7 Aihion muokkaus valssaamalla [13].

Oikaisun ja leikkauksen jälkeen jatkuvavaletut ahiot tarkastetaan ja havaitut virheet poistetaan. Tarkastetut ja kunnostetut ahiot kuumennetaan jatkuvatoimisissa uuneissa 1250 °C lämpötilaan [17], joka on tyypillinen kuumavalssauslämpötila [2]. Aihoiden kuumennuksen jälkeen niiden pinnasta poistetaan heikutushilse 200 baarin paineisella vesisuihkulla [17]. Heikutushilse on kuumennuksessa aihion pintaan syntyvä oksidien muodostama kerros, joka heikentää tuotteen pinnanlaatua ja voi vahingoittaa sekä valssainta että valssattua tuotetta. Valssaus alkaa esivalssaimilla, jotka muokkaavat aihion poikkileikkaukseltaan muotovalssaimille sopivaksi kiskoaihioksi.

Muotovalssaimilla kiskoaihion poikkileikkausta muutetaan vähitellen kohti lopullista tuotetta (Kuva 8). Esivalssaimilta tuleva kiskoaihio saavuttaa lopullisen muotonsa 8 – 11 perättäisellä muotovalssainten pistolla [17]. Standardin EN13674-1 [11] mukaan lopullisen kiskon poikkipinta-ala saa olla enintään yhdeksäsosa alkuperäisen valetun aihion poikkipinta-alasta. Tällä varmistetaan materiaalin riittävä muokkautuminen, joka takaa hienorakeisen, tiiviin ja homogeenisen mikrorakenteen. Käyttämällä valetun aihion poikkileikkaukselle mittoja 265 x 385 mm kiskoprofiilin 60 E 1 poikkileikkaus ($A = 76,70 \text{ cm}^2$ [11]) on noin 1/13 aihion poikkileikkauksen alasta. Viimeisen valssauspiston yhteydessä kiskon varteen merkitään kiskon valmistaja, teräslaatu, valmistusvuosi sekä kiskoprofiili korkeintaan 4 m välein. Näiden lisäksi varren toiselle puolelle kuumaleimataan sulatuserä, valulinja sekä valetun aihion kohta, josta kyseinen kisko on valssattu. [11]

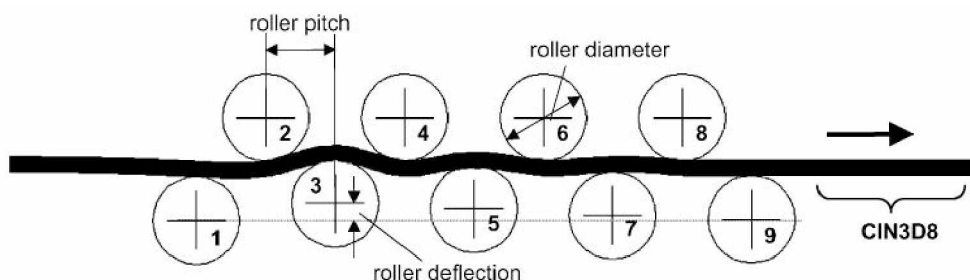


Kuva 8 Kiskon profiilin kehittyminen peräkkäisten valssauspistojen avulla [13].

2.2.4 Viimeistely

Valssauksen jälkeen kiskojen annetaan jäähtyä askelpalkkilavalla. Koska kiskon hamara ja jalka ovat erikokoiset, jäähtyvät ne eri nopeuksilla. Tästä seuraa kiskon pystysuuntainen vääntyminen. [17] Kiskon suoristamiseksi se oikaistaan kaksivaiheisesti pysty- ja vaakasuunnassa rullaoikaisua käyttäen [11]. Koska rullaoikaisu on kiskonvalmistuksen viimeinen vaihe, määräytyvät kiskon suoruus, kulkupinnan tasaisuus sekä jäännösjännitykset sen mukaan [18].

Rullaoikaisukoneessa on yleensä 5 – 9 rullaa (Kuva 9). Kolmen ensimmäisen rullan muodostama kolmio aiheuttaa kiskoon tietyn suuruisen muodonmuutoksen. Toisen, kolmannen ja neljännen rullan muodostama kolmio tuottaa ensimmäistä muodonmuutosta vastaavan, mutta vastakkaissuuntaisen muodonmuutoksen. Viidennen ja sen jäljessä olevien rullien tehtävänä on suoristaa kisko tuottamalla siihen asteittain pienempiä vuorottain vastakkaissuuntaisia muodonmuutoksia. Kiskojen päät jäävät rullaoikaisukoneen fyysisen rakenteen vuoksi vaille oikaisua. [19] Niiden oikaisemiseksi on sallittua käyttää paino-oikaisua (pressing) [11]. Kiskoon jää rullaoikaisun seurauksena jaksollista pitkittäistä aaltoisuutta eli oikaisuvirheitä (rolling defects), jonka aallonpituus vastaa rullaoikaisukoneen rullien ympärystimittoja [17]. Hyvän pinnanlaadun takaamiseksi valmistajan on huolehdittava tehokkaasta hilseen poistosta myös rullaoikaisun aikana.



Kuva 9 Kiskon rullaoikaisun periaatekuva [18].

2.2.5 Hienoperlitisöinti

Perliitin mekaaniset ominaisuudet riippuvat muun muassa sen raakoista ja sementtiittilamellien paksuudesta. Koska nämä ovat riippuvaisia lämpötilasta, jossa perliitti muodostuu, on kiskojen kulumis- ja vierintäväsymisominaisuuksia mahdollista parantaa lämpökäsittelyllä [20].

Lämpökäsittelyä, jolla paremmat mekaaniset ominaisuudet antava hienorakeinen mikrorakenne saavutetaan, kutsutaan hienoperlitisöinniksi. Hienoperlitisöinnissä 850 – 950 °C lämpötilassa oleva, austeniittisen mikrorakenteen omaava kisko jäähdytetään nopeutetusti 500 – 650 °C:een ja pidetään siinä lämpötilassa, kunnes austeniitti on täysin hajaantunut perliitiksi eli perliittireaktio on tapahtunut loppuun saakka [17]. Koska nopeutetun jäähdytyksen seurauksena austeniitti hajaantuu alhaisessa lämpötilassa, muodostuvat rakeet ja perliitin sementtiittilamellien välinen etäisyys sekä paksuus pienemmiksi kuin hitaasti jäähtyneessä teräksessä [1, 4]. Näiden ansiosta teräkselle saadaan korkeampi lujuus ja kovuus ilman sitkeyden oleellista alenemista [17]. Hienoperlitisöinti voidaan tehdä erillisenä tai osana tuotantolinjaa.

Erillisessä lämpökäsittelyssä valmiin kiskon hamara saatetaan austeniittiseksi induktiokuumennuksella. Hamaraa kuumennetaan noin 2 – 6 minuuttia, jolloin se saavuttaa vaaditun 850 – 950 °C lämpötilan. Tämän jälkeen hamara jäähdytetään hallitusti paineilman, vesisuihkun tai vesisumun avulla edellä esitettyyn lämpötilaan, jossa perliittireaktio tapahtuu. Erillinen lämpökäsittely on jatkuva prosessi, mutta kiskon uudelleen kuumennuksesta ja jäähdytyksestä seuraavien muodonmuutosten vuoksi rulla-oikaisu on tehtävä uudelleen. [17]

Tuotannon kannalta tehokkaampi menetelmä on sijoittaa lämpökäsittely osaksi tuotantolinjaa. Tällöin teräs jäähdytetään nopeutetusti suoraan kuumavalssauksen jälkeen. Jäähdytys voidaan toteuttaa samalla tavoin kuin erillisessä lämpökäsittelyssä tai koko kisko voidaan jäähdyttää kerralla kääntämällä kisko ylösalaisin ja kastamalla kiskon hamara jäähdytysväliaineeseen. Jäähdytyksen jälkeen kiskolle tehdään rulla-oikaisu. [17]

2.2.6 Tarkastus

Standardin EN13674-1 [11] mukaan kiskon valmistajan on valvottava tuotteen laatua määrätyin vähimmäistestein. Testit jaetaan kvalifiointi- ja laadunvalvontatesteihin. Kvalifiointitesteillä valmistaja osoittaa olevansa pätevä tuottamaan standardin mukaisia tuotteita. Ne tehdään 60 E 1 tai raskaimmalle tuotannossa olevalle profiilille vähintään kerran viidessä vuodessa tai aina, kun tuotannossa tapahtuu merkittäviä muutoksia. Lisäksi jäännösjännitysten mittausta on tehtävä vähintään kerran kahdessa vuodessa kaikille teräslaaduille. Kvalifiointitesteissä määritetään [11]:

- Murtumissitkeys (EN13674-1 liite B)
- Väsymissärön kasvunopeus (BS 6835-1)
- Väsymiskestävyys (ISO 1099)
- Jäännösjännitykset kiskon jalassa (EN13674-1 liite C)
- Vetolujuus ja murtovenymä (EN 10002-1)

- Suotautumisen² laajuus (ISO 4968)
- Kulkupinnan kovuuden vaihtelu (lämpökäsitellyt laadut) (EN ISO 6506-1)

Laadunvalvontatesteillä varmistetaan tuotannossa olevien tuotteiden jatkuva hyvä laatu. Ne jakautuvat laboratoriotesteihin ja kiskon mittapitävyyden varmistamiseen.

Laboratoriotesteissä määritetään [11]:

- Kiskoteräksen kemiallinen koostumus sulasta ja kiinteästä materiaalista. Koostumuksen on oltava kyseiselle teräslaadulle standardissa määrättyjen rajojen sisällä ja vety- ja happipitoisuuksien on oltava määrättyjä tasoja alhaisemmat.
- Mikrorakenne 500 kertaista suurennosta käyttäen. Eri teräslaatuojen sallitut mikrorakenteet on käsitelty luvussa 2.3.
- Hiilenkatokerroksen paksuus kovuustestein. Hiilenkatokerros on kiskon valmistuksen yhteydessä kiskon pinnalle muodostuva hiilestä köyhä kerros. Hiilenkadosta seuraava yhtenäinen ferriittiverkosto ei saa olla paksuudeltaan yli 0,5 mm.
- Oksidipitoisuus.
- Suotautumisen laajuus poikkittaisista kiskonäytteistä rikkijälkitekniikalla (sulfur prints).
- Kovuus Brinellin kovuusmittauksella. Myös muita kovuusmittausmenetelmiä, kuten Vickersin ja Rockwellin kovuusmittauksia, on mahdollista käyttää. Kovuus mitataan kiskon kulkupinnasta. Lämpökäsitellyille laaduille tehdään lisämittauksia hamaran poikkileikkauksen eri kohdista.
- Lujuus määritetään lämpökäsittämättömistä teräslaaduista tavallisesti laskemalla käyttäen valmistajan määrittämiä ennustavia kaavoja (predictive equations). Lämpökäsitellyille laaduille tehdään vetokoe pyöreää vetokoesauvaa käyttäen.

Laboratoriotestien tiheydet vaihtelevat testistä ja teräslaadusta riippuen yhdestä testistä 50 tonnia valettua terästä kohti yhteen testiin valusarjaa kohti.

Kiskojen mittapitävyydestä varmistetaan [11]:

- Profiili
- Suoruus
- Kulkupinnan tasaisuus
- Kierous

Profiilille on olemassa kaksi laatuluokkaa, X ja Y, joista X-luokassa on tiukemmat toleranssit. Suoruudelle, kulkupinnan tasaisuudelle ja kieroudelle on olemassa niin ikään kaksi laatuluokkaa, A ja B, joista A-luokassa on tiukemmat toleranssit. [11]

Kaikki kiskot tarkastetaan sisäisten ja pintavikojen varalta jatkuvilla tarkastusmenetelmillä. Sisäisten vikojen havaitsemiseen käytetään ultraäänitarkastusta (ks. luku 6.1.3), jonka on katettava vähintään 70 % hamarasta, 60 % varresta sekä jalan keski-

² Suotautuminen tarkoittaa valukappaleen jähmettyessä tapahtuvaa seosaineiden epätasaista jakautumista.

osan. Hamara tarkastetaan suoraan yläpuolelta sekä molemmilta sivuilta. Mikäli kiskossa havaitaan virheitä, on virheellinen osuus poistettava. Kutakin tarkastettavaa profiilia kohden on oltava keinotekoisilla vioilla varustettu kalibrointikisko, jonka avulla tarkastuslaitteisto kalibroidaan prosessin aluksi sekä aina kahdeksan tunnin välein. [11]

Kiskot on tarkastettava visuaalisesti tai automaattisesti kultakin puolelta pintavikojen havaitsemiseksi. Hamaran ja jalan pintavikojen havaitsemiseen voidaan käyttää pyörrevirtatarkastusta (ks. luku 6.1.4). [11, 17]

2.3 Teräslaadut

Eurooppalainen standardi EN13674-1 [11] määrittelee seitsemän erilaista kiskoteräslaadua. Nämä laadut ovat R200, R220, R260, R260Mn, R320Cr, R350HT ja R350LHT, joista kaksi viimeistä ovat lämpökäsiteltyjä laatuja. Nimessä esiintyvä luku kuvaa kyseisen teräslaadun vähimmäiskovuutta Brinellin asteikolla. Käytäntö poikkeaa aiemmin käytetystä UIC:n [21] mukaisesta laatuja nimeämistavasta, jossa teräslaadut nimetään niiden murtolujuuden mukaan, esimerkiksi 700, 900A ja 1100. [22] Kovuuteen pohjautuva nimeäminen on perusteltua, sillä kovuuden mittaaminen on lujuuden mittausta vaivattomampaa ja terästen tapauksessa materiaalin lujuutta voidaan arvioida kovuuden arvosta laskemalla [23]. Standardin EN13674-1 [11] ja UIC:n määrelehden 860 [21] määrittelemien laatuja koostumuksissa ja mekaanisissa ominaisuuksissa ei ole kovinkaan merkittäviä eroja. Huomattavimpana erona EN-standardi määrittelee tiukemmat rajat rikille ja fosforille, jotka vaikuttavat haitallisesti teräksen ominaisuuksiin. [17] Oleellisimpien teräslaatuja kemialliset koostumukset ja mekaaniset ominaisuudet on esitetty taulukoissa 1 ja 2.

Taulukko 1 Euroopassa käytettyjen kiskoteräslaatuja kemiallisten koostumusten rajat [11, 21].

Teräslaatu	C %	Mn %	Si %	Cr %	P _{max} %	S _{max} %
700	0,40 – 0,60	0,80 – 1,25	0,05 – 0,35	-	0,05	0,05
900A	0,60 – 0,80	0,80 – 1,30	0,10 – 0,50	-	0,04	0,04
900B	0,55 – 0,75	1,30 – 1,70	0,10 – 0,50	-	0,04	0,04
1100	0,60 – 0,82	0,80 – 1,30	0,30 – 0,90	0,80 – 1,30	0,03	0,03
R200	0,40 – 0,60	0,70 – 1,20	0,15 – 0,58	0,15 max	0,035	-
R260	0,62 – 0,80	0,70 – 1,20	0,15 – 0,58	0,15 max	0,025	-
R320Cr	0,60 – 0,80	0,80 – 1,20	0,50 – 1,10	0,80 – 1,20	0,20	-
R350HT	0,72 – 0,80	0,70 – 1,20	0,15 – 0,58	0,15 max	0,020	-
R350LHT	0,72 – 0,80	0,70 – 1,20	0,15 – 0,58	0,30 max	0,020	-

Taulukko 2 Euroopassa käytettyjen kiskoteräslaatujen murtolujuudet (R_m), murtovenymät (A) ja kovuudet [7, 11, 21].

Teräslaatu	R_m (MPa)	A (%)	Kovuus
700	680 – 830	≥ 14	207 – 241 HV
900A	880 – 1030	≥ 10	≥ 265 HV
900B	880 – 1030	≥ 10	≥ 265 HV
1100	≥ 1080	≥ 9	≥ 327 HV
R200	≥ 680	≥ 14	200 – 240 HBW
R260	≥ 880	≥ 10	260 – 300 HBW
R320Cr	≥ 1080	≥ 9	320 – 360 HBW
R350HT	≥ 1175	≥ 9	350 – 390 HBW
R350LHT	≥ 1175	≥ 9	350 – 390 HBW

Lämpökäsittämättömien kiskoterästen mekaaniset ominaisuudet perustuvat pääasiassa niiden korkeaan hiili- ja mangaanipitoisuuteen. R260 on nykyisin Euroopassa ja Suomessa yleisimmin käytetty peruslaatu [17, 24], jonka R200:een nähden korkeampi kovuus ja lujuus ovat seurausta korkeammasta hiilipitoisuudesta. R260Mn on R260-laadun niukkahiilinen versio, jossa lujittuminen perustuu korkeampaan mangaanipitoisuuteen. Esveldin [17] mukaan tämä heikentää hitsattavuutta, mutta parantaa iskusitkeyttä. Korkealujuuksinen R320Cr-laatu sisältää hiilen ja mangaanin lisäksi kromia sekä hieman muita laatuja enemmän piitä [11].

Kovuuden kasvaessa kiskon kulutuskestävyys paranee [25], joten kovempia laatuja pyritään käyttämään raskaammin liikennöidyillä raiteilla sekä paikoissa, jotka ovat alttiita voimakkaalle kulumiselle [26]. Esimerkiksi pienisäteisten kaarteiden ulkokiskoissa voi ilmetä suurten ohjausvoimien seurauksena voimakasta kulumista. Kovuuden kasvattaminen seostuksen avulla johtaa kuitenkin sitkeyden alenemiseen. Mikäli teräksen sitkeys on liian alhainen, voi se kuormituksen alaisena etenkin kylmissä olosuhteissa murtua.

Kiskon mikrorakenteeseen ja mekaanisiin ominaisuuksiin voidaan seostuksen ohella vaikuttaa myös lämpökäsittelyllä, jolla kiskon hamaraan tuotetaan hienoperliittinen mikrorakenne. Tavalliseen mikrorakenteeseen nähden hienoperliittisellä rakenteella saavutetaan suurempi kovuus ja lujuus ilman oleellista sitkeyden laskua. Heyderin ja Girschin [20] mukaan hienoperlitisoinnilla saavutetaan R350HT laadulle kolminkertainen kulutuskestävyys R260 laatuun nähden. R350HT ja R350LHT ovat lämpökäsitteltyjä laatuja, joiden kemialliset koostumukset vastaavat R260-laatua sillä erolla, että R350LHT sisältää lisäksi pienen määrän kromia. Esveldin [17] mukaan kromilisyksen ansiosta R350LHT:n leimuhitsauksessa ei tarvitse käyttää jälkilämmitystä, jolloin hitsausprosessi nopeutuu. Leimuhitsaus on kiskojen jatkohitsausmenetelmä, josta kerrotaan tarkemmin luvuissa 2.8 sekä 3.3.2.

Standardi EN13674-1 [11] asettaa rajoituksia kiskoissa käytettyjen teräslaatujen mikrorakenteille. Pehmeimpien laatujen R200 ja R220 mikrorakenteiden on oltava perliittin ja raerajaferritiin seos. Kovempien laatujen R260 ja R260Mn sekä lämpökäsitteltyjen laatujen R350HT ja R350LHT mikrorakenteiden on pääosin oltava perliittisiä, pieniä määriä raerajaferritiä kuitenkin sallitaan. Kromiseosteisen R320Cr laadun mikrorakenteen on oltava täysin perliittinen. Missään laaduista ei sallita raerajasementiittiä, martensiittia eikä bainiittia.

Vaihteiden risteysten valmistuksessa käytetään Hadfieldin mangaaniterästä. Se on iskukuormituksesta voimakkaasti muokkauslujittuva austeniittinen teräslaatu, joka saavuttaa lopulliset mekaaniset ominaisuutensa vasta, kun riittävä määrä liikennettä on kulkenut sen ylitse. Vilkkaasti liikennöidyllä pääradalla tämä tapahtuu noin 2 – 3 viikon kuluessa. [7] Mangaaniterästä ei käytetä normaalina kiskoteräksenä, sillä linjaraiteilla siihen ei kohdistu riittävää iskukuormitusta lujittumisen aikaansaamiseksi. Lujittumattomana mangaaniteräksen kulumiskestävyys on perliittistä terästä huomattavasti heikompi. [17] Mangaaniteräsoisien valmistuksessa voidaan mekaanisten ominaisuuksien parantamiseksi käyttää räjähdyskarkaisua, jossa räjähdyksellä tuotetaan kappaleeseen voimakas iskukuormitus [27].

2.4 Valmistajat

Suomen rataverkolla olevista kiskoista ei ole kattavaa tietokantaa. Kiskovikaraportteissa havaittujen vikojen yhteydessä on tavallisesti merkintä kiskon valmistajasta, profiilista ja valssausvuodesta sekä mahdollisesti teräslaadusta. Taulukossa 3 on listattuna valmistajat, joiden kiskoissa on vuoden 2008 kiskovikaraportin mukaan havaittu vikoja. Taulukossa ilmoitettu valmistusvuosien vaihteluväli kuvaa ensimmäistä ja viimeistä valmistusvuotta, joiden välillä pääosa kyseisen valmistajan kiskovikatilastoissa mainituista kiskoista on valmistettu.

Taulukko 3 Vuoden 2008 kiskovikatilastossa esiintyvät kiskon valmistajat ja valmistusvuodet.

Valmistaja	Valmistusvuodet
Angleur	1922 – 1931
Azoustalj	1951 – 1964
Bochum	1921 – 1929
Bolckow Baughan	1933 – 1933
British Steel	1990 – 1997
Cockerill	1923 – 1923
Domnarvet	1990 – 2004
Hayange	1992 – 1997
Huta katowice	1984 – 1989
Ilva, Lucchini	1992 – 1996
Imatra (Ovako)	1924 – 1988
Inexa	1994 – 1994
Krupp	1921 – 1928
Marmiche	1924 – 1936
Micheville	1936 – 1953
Providence Rehon	1949 – 1952
Rodange	1930 – 1939

Sambre & Moselle	1949 – 1952
Thyssen	1990 – 2007
Trinec	1995 – 2006
Villerupt	1975 – 1976
Vitkovicke	1952 – 1958
Workington	1936 – 1936
Vöest Alpine	1990 – 2005

Kiskovikatilastojen pohjalta voidaan todeta, että Suomen rataverkolla on yli 20 eri valmistajan valmistamaa kiskoja noin 90 vuoden ajalta. Suurin osa vikahevainnoista on tehty Azoustaljin ja Imatran valmistamista kiskoista. Viimeisimmät Azoustaljin kiskot on hankittu Suomeen 1960-luvun alkupuolella. Imatra puolestaan on lopettanut kiskojen valmistuksen vuonna 1988 [28]. Kiskovikatilastojen pohjalta ei voida tehdä tarkkoja arvioita kiskojen suhteellisista osuuksista Suomen rataverkolla. Tämä on seurausta ensinnäkin siitä, että herkimmin vikaantuvien, kuten vanhojen kiskojen osuus ylikorostuu ja toiseksi siitä, että uusia, viiden viimeisen vuoden aikana asennettuja kiskoja ei pääsääntöisesti tarkasteta ultraäänellä, jonka vuoksi ne jäävät tilastoista pois [28].

Viitalan [28] mukaan 2000-luvulla Suomessa on linjaraitteeseen asennettu seuraavien valmistajien kiskoja:

- Arcelor Mittal
- TSTG
- Trinec

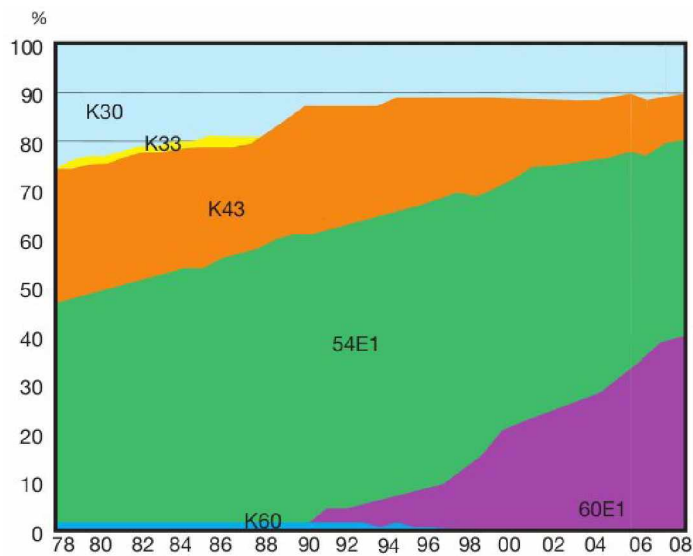
Kyseiset valmistajat tuottavat kiskonsa Euroopassa. Maailmalla toimii lukuisia muitakin kiskojen valmistajia, esimerkkeinä japanilainen Nippon Steel sekä yhdysvaltalainen Rocky Mountain Steel Mills.

2.5 Kiskoprofiilit

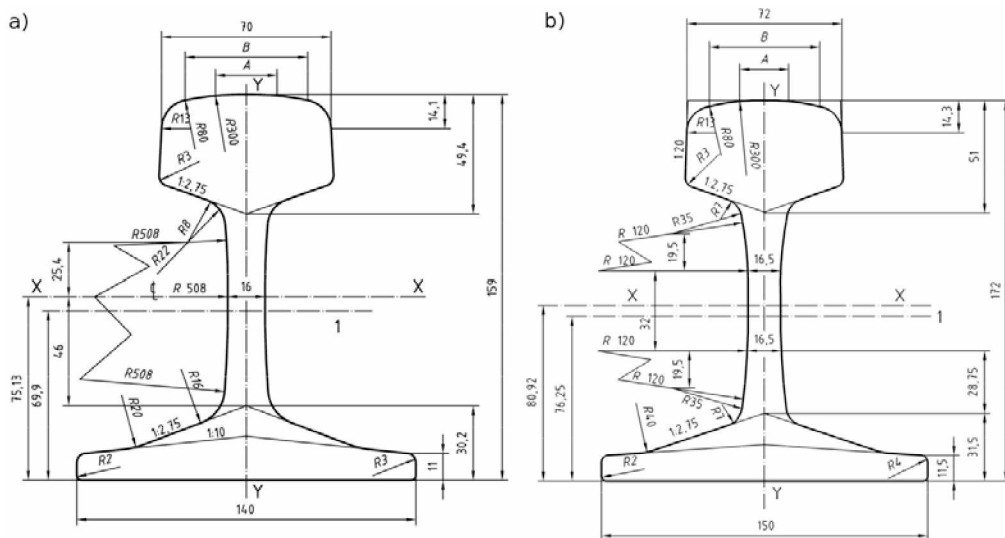
Kiskot ovat saavuttaneet nykyisen muotonsa, jossa on massiivinen hamara, korkea varsi ja leveä jalka, noin 1800-luvun puolessavälissä [12]. Massiivinen hamara antaa kiskolle kulutuspintaa, kapea ja korkea varsi antaa kiskolla pystysuuntaista taivutusjäykkyyttä ja leveä jalka jakaa kiskoon kohdistuvat kuormat laajemmalle alueelle pölkyn pinnalle. Nykyisin Suomessa ja Euroopassa käytössä olevaa profiilia kutsutaan Vignole- eli leveäjalkaiseksi kiskoprofiiliksi.

Kuvassa 10 on esitetty vuosina 1978 – 2008 Suomen pääraiteilla olleiden kiskojen kiskoprofiilien osuudet. Kuvasta nähdään, että vuoden 1990 jälkeen kiskoprofiilin 60 E 1 kiskojen osuus on kasvanut tasaisesti, kun vastaavasti kevyempien kiskoprofiilien K30 ja K43 kiskojen osuudet ovat pienentyneet. Nykyisin Suomeen hankittavien uusien kiskojen profiilin on kiskojen teknisten toimitusehtojen [24] mukaan oltava joko 54 E 1 tai 60 E 1 (Kuva 11a ja Kuva 11b). Lisäksi näihin liittyvien muiden kiskojen, kuten kielikiskojen profiilien on oltava käytettävän normaalin kiskoprofiilin kanssa yhteen-

sopivia. Käytännössä kuitenkin vuoden 1996 jälkeen Suomessa asennetut uudet kiskot ovat olleet profiilin 60 E 1 -kiskoja.



Kuva 10 Kiskoprofiilien osuudet Suomen pääraiteilla vuosina 1978 – 2008 [29].



Kuva 11 Kiskoprofiilien a) 54 E 1 ja b) 60 E 1 kaavakuvat [11].

Kiskon profiilin merkinnässä oleva ensimmäinen luku kuvaa kiskon massaa metriä kohti. Kirjain E kertoo, että kyseessä on EN-standardin mukainen profiili ja sen jäljessä oleva numero on kyseisen profiilin juokseva järjestysluku. Esimerkiksi profiilin 60 E 1 kisko painaa 60 kg/m ja on EN-standardissa kyseisen painoisen kiskon kiskoprofiilin ensimmäinen versio. Standardin EN13674-1 [11] mukaan profiilit 60 E 1 ja 54 E 1 on kehitetty profiilien UIC60 ja UIC54 pohjalta. Viitalan [28] mukaan ero uusien standardin EN13674-1 [11] mukaisten ja vanhojen UIC profiilien välillä on marginaalinen.

Suurempi kiskon metripaino tarkoittaa suurempaa kiskon poikkipinta-alaa, josta seuraa suurempi taivutusvastus ja hitausmomentti. Lisäksi 60 E 1 kiskon jalka on 54 E 1 kiskon jalkaa leveämpi, jonka seurauksena pölkkyyn kohdistuva voima jakautuu laa-

jemmalle alueelle. Suurempi kiskopaino mahdollistaa suuremman nopeuden tietyllä akselipainolla. [26]

Kiskoprofiilit K30 ja K43 ovat vanhempia profiileja. Niiden merkinnässä oleva luku kuvaa kiskon metripainoa kilogrammoina [26]. Kyseisiä profiileja on yhä käytössä lähinnä vähän liikennöidyillä rataosuuksilla.

2.6 Valmistuspituudet

Muttonin et al. [30] mukaan aikana ennen kiskoja hitsausta kiskon elinkaarta rajoitti sidekiskoatkoksen elinkaari. Kun jatkoksia alettiin hitsata, voitiin niiden arvioida olevan vähintään peruskiskon veroisia. Nykyään, teräslaatuja kehittyttyä, jatkokset ovat jälleen kiskon heikoin kohta. Tämän vuoksi jatkosten määrä pyritään minimoimaan ja jatkuvakiskoraiteissa pyritään käyttämään mahdollisimman pitkäksi valssattuja kiskoja. Kiskoja suurin mahdollinen valssauspituus riippuu valmistajan käytössä olevan valssauslaitteiston fyysisistä ominaisuuksista. Esimerkiksi Saksassa kiskoja valssauspituudet ovat kasvaneet taulukon 4 mukaisesti. Valssatut kiskot on mahdollista hitsata hitsauspajalla pidemmiksi osakokonaisuuksiksi. [31]

Taulukko 4 Kiskoja valssauspituudet Saksassa eri vuosina [31].

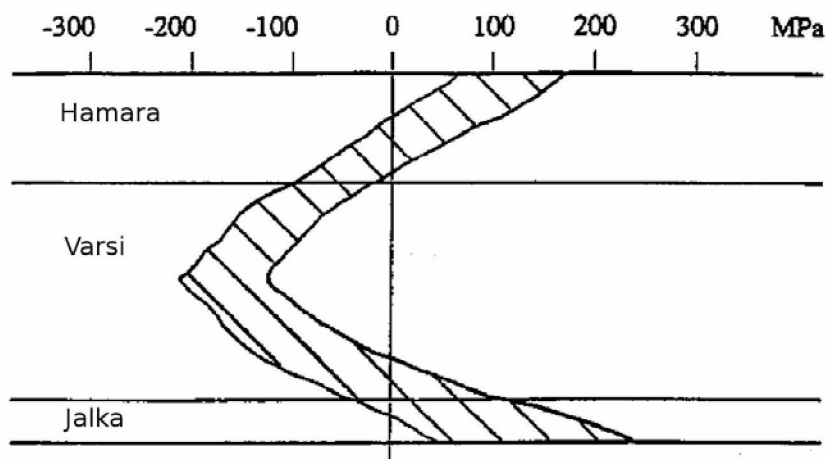
Vuosi	1880	1910	1940	1960	1980	1999
Pituus [m]	6	12	18	30	60	120

Ratakiskoja teknisten toimitusehtojen [24] mukaan 54 E 1 profiilin kiskoja vähimmäistoimituspituus on tavallisesti 30 metriä. 60 E 1 profiilin kiskoja vähimmäistoimituspituus on tavallisesti 50 metriä, mikäli kiskot tullaan hitsaamaan hitsauspajalla. Mikäli kiskot toimitetaan suoraan asennettaviksi, on vähimmäispituus tavallisesti 100 metriä. Kiskoja todellinen toimituspituus määritellään kuitenkin tapauskohtaisesti tilauksen yhteydessä. Esimerkiksi Kerava-Lahti oikoradalle hankittujen kiskoprofiilin 60 E 1 kiskoja vähimmäisvalssauspituudeksi määrättiin 80 metriä [32].

2.7 Jännösjännitykset

Kiskon hamara ja jalka ovat erikokoiset, jonka seurauksena ne jäähtyvät eri nopeuksilla. Tämä johtaa kiskon jäähtyessä sen pystysuuntaiseen vääntymiseen. Kiskon oikaisemiseksi sille tehdään rullaoikaisu (ks. luku 2.2.4). Rullaoikaisussa kiskoa muokataan mekaanisesti, jonka seurauksena kiskoon muodostuu jännösjännityksiä. [33] Yleisesti jännösjännitykset luokitellaan syntytapansa mukaan termisiksi, faasimuutos- ja muokkausjännityksiksi [1].

Tyypillinen rullaoikaistun kiskon jännösjännitys jakauma on esitetty kuvassa 12. Kiskon jalka ja hamara ovat vetojännityksen ja varsi puristusjännityksen alaisia. Koska jännösjännitykset vaikuttavat materiaaliin samalla tavoin kuin ulkoisetkin jännitykset, heikentävät kiskon pinnalla olevat vetojännitykset kiskon kestävyyttä. Standardin EN13674-1 [11] mukaan pitkittäinen jännösjännitys kiskon jalan keskellä saa suurimmillaan olla 250 MPa.



Kuva 12 Jäännösjännitys jakauma rullaoikaistussa kiskossa [18]. Positiivinen jännitys on vetoa, negatiivinen puristusta.

2.8 Jatkoshitsaus kiskohitsaamolla

Jatkoshitsit ovat jatkuvaksi hitsatun kiskon heikoimpia kohtia. Tämän vuoksi niiden määrää pyritään vähentämään pidemmillä valssauspituuksilla. Kiskon valmistajasta riippuen pisin mahdollinen valssauspituus voi kuitenkin olla verrattain lyhyt, esimerkiksi vain 25 metriä. Mikäli raiteeseen asennettavat kiskot ovat lyhyitä, vaatii jatkuva-kiskoraiteen rakentaminen suuren määrän työläitä radalla tehtäviä hitsejä. Radalla tehtävien hitsien määrää on mahdollista vähentää hitsaamalla kiskoista pidempiä kokonaisuuksia ennen niiden kuljetusta työmaalle. Hitsaus tehdään erityisellä kiskohitsaamolla. Yhteenhitsattujen kiskojen kokonaispituus voi olla jopa 500 metriä.

Kiskohitsaamolla tehtävä kiskojen hitsaus tehdään leimuhitsaamalla. Leimuhitsauksessa kaksi kiskoa liitetään toisiinsa sähkövirran avulla. Prosessissa vastakkain asetettujen kiskojen päät kuumennetaan sähkövirran avulla tiettyyn lämpötilaan. Kun päät ovat kuumentuneet riittävästi, ne puristetaan (tyssätään) sopivalla voimalla vastakkain, jolloin niiden välille syntyy hitsiliitos. Leimuhitsauksen periaate esitetään tarkemmin jäljempänä kiskojen jatkoshitsausta käsittelevässä luvussa 3.3.2.

Kiskohitsaamalla tehdyt jatkoshitsit vähentävät asennukseen tarvittavaa aikaa ja ovat radalla tehtyjä jatkohitsejä parempilaatuisia. Parempi laatu on pääasiassa seurausta paremmin hallituista hitsausolosuhteista, kuten ympäristön lämpötilasta ja kosteudesta. [31]

3 Jatkuvakiskoraiteen rakentaminen

Tehtaalla valmistetut ja mahdollisesti kiskohitsaamalla yhteen hitsatut kiskot toimitetaan työmaalle, jossa ne asennetaan raiteeseen. Jotta kiskot säilyisivät vaurioittomina kuljetuksessa sekä työmaalla, on niiden käsittelyyn liittyen olemassa ohjeita ja määräyksiä. Näistä kerrotaan tämän luvun ensimmäisessä osassa. Toisessa osassa käsitellään kiskojen asennusta ja neutralointia sekä kiskojen neutraalilämpötilaa. Viimeinen osa keskittyy kiskojen jatkohitsaukseen.

3.1 Käsittely

Kiskot kuljetetaan työmaalle tavallisesti raiteita pitkin kiskonkuljetusvaunuilla. Vau-
nujen ominaisuuksista riippuen niillä on mahdollista siirtää jopa satoja metrejä pitkiä kiskoja. Kiskot kiinnitetään vaunuun ainoastaan keskiosastaan, jonka ansiosta rullien päälle sijoitetut kiskot pääsevät kaarteissa liikkumaan toistensa suhteen.

Kiskojen nosto ja siirto on tehtävä sellaisia apuvälineitä käyttäen, että ne eivät aiheuta kiskoon pintavaurioita, kuten naarmuja tai koloja, eivätkä pysyviä muodonmuutoksia [26]. Mikäli kiskoja käsitellään huolimattomasti, voi siitä seurata pintavaurioita kiskoon. Kuormituksen alaisena ruhjeet ja muut vauriot voivat toimia jännityskeskittiminä ja niihin voi ydintyä säröjä. Kiskossa vallitsevan jännitystilän johdosta kiskossa poikittain olevat säröt ovat pitkittäisiä huomattavasti haitallisempia. Täten kiskon sivuttaissuuntainen siirtäminen maata pitkin on kiellettyä. Pituussuunnassa kiskoja on sallittua siirtää maata pitkin kohtuullisia matkoja edellyttäen, että siirron aikana ei tapahdu metallista kosketusta ja kisko pysyy siirron ajan pystyasennossa. [26] Pituussuunnassakaan maata pitkin siirto ei kuitenkaan ole suotavaa, vaan kiskon alla tulisi käyttää rullia.

Kiskojen pituussuuntainenkin siirto voi aiheuttaa kiskolle huomattavaa haittaa, etenkin mikäli kiskoa siirrettäessä sen paino on pienen alueen varassa. Näin voi tapahtua esimerkiksi, kun siirrettävä kisko on lyhyt ja sen toinen pää on ilmassa. Siirrettäessä kiskoa näin, maahan koskeva kiskon pää voi kuumeta ja kulua huomattavasti. Kuvassa 13 on esimerkki kiskosta, joka on vaurioitunut tällä tavoin. Mikäli siirrettävä kisko on pitkä, taipuu se yhdestä päästä nostettaessa. Taipumisen ansiosta kiskon paino jakautuu suuremmalle pinta-alalle, eikä siirto välttämättä vaurioita kiskoa.

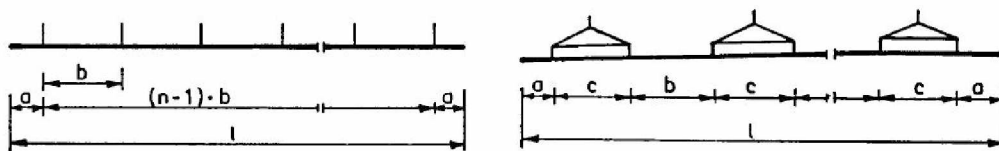


Kuva 13 Kisko, jonka jalka on vaurioitunut virheellisen siirron seurauksena. Jalka on ohentunut kulumisen seurauksena huomattavasti ja sen väri on muuttunut kuumenemisen seurauksena.

Kiskojen on nostettaessa ja laskettaessa oltava pystyasennossa. Noston aikana kisko ei saa taipua taulukossa 5 esitettyjä arvoja enempää. Tähän päästään noudattamalla kuvassa 14 havainnollistettuja nostopisteiden paikkoja ja niiden välisiä etäisyyksiä. Taulukossa 6 on esitetty eri kiskopituuksilla käytettävät nostopisteiden lukumäärät ja niiden väliset etäisyydet. Suluissa esitetyt arvot ovat nostopisteiden etäisyyksien raja-arvot.

Taulukko 5 Kiskon nostossa sallitut suurimmat taipumat [26]

Kiskoprofiili	Suurin taipuma pystysuunnassa [mm/m]	Suurin taipuma sivusuunnassa [mm/m]
60 E 1	22	130
54 E 1	26	140



Kuva 14 Kiskojen nostopisteiden väliset etäisyydet a, b ja c [26].

Taulukko 6 Nostopisteiden vähimmäismäärä [n_{min}] ja pisteiden väliset etäisyydet kiskoprofiileille 60 E 1 ja 54 E 1 eri kiskopituuksilla [l] [26]

Kiskoprofilille 60 E 1				
l [m]	n_{min} [kpl]	a [m]	b [m]	c [m]
30	2	6,75 (6,5...7,5)	16,5 (15.....17)	= b
60	4	5,25 (5.....6)	16,5 (16.....16,5)	= b
108	7	6,0 (4,5....7,5)	16,0 (15,5...16,5)	= b
120	8	4,0 (2.....6)	16,0 (15.....16,5)	= b
150	10	3,0 (1.....7,5)	16,0 (15.....16,5)	= b
> 150	< 7,5	< 16,5		
Kiskoprofilille 54 E 1				
l [m]	n_{min} [kpl]	a [m]	b [m]	c [m]
25	2	6,25 (5,25...8,5)	12,5 (8...14,5)	= b
30	2	6,5 (6,25...7,5)	17,0 (15.....17,5)	= b
50	3	8,0 (7,5...8,5)	17,0 (16,5...17,5)	= 2b
100	6	7,5 (7...8,5)	17,0 (16,5...17)	= 2b
120	8	7,5 (5...8,0)	15,0 (14,8...15,7)	= b
150	9	7,0 (7...8,5)	17,0 (16,5...17)	= 2b
>150	< 8,50	< 17,0		

3.2 Asennus ja neutralointi

Jatkuvakiskoraiteen rakentamisessa käytetyt kiskot ovat tavallisesti 100 – 180 m pituisia. Suomessa jatkuvakiskoraide rakennetaan tavallisesti siten, että kiskot asennetaan raiteeseen, kiinnitetään kiinnikkeillä ratapölkkyihin ja liitetään toisiinsa tilapäisjatkoksia käyttäen. Tilapäisjatkokset ovat sidekiskoatkoksia, jotka on kiinnitetty kahdella sideruuvilla kiskoon. Tilapäisjatkoksilla varustettu kisko on neutraloitava ja loppuhitsattava, ennen kuin sen yli kulkenut liikennemäärä ylittää 100 000 brt. [34]

Ennen neutralointia tilapäisjatkoksilla liitetystä kiskosta on poistettava jännitykset. Jännitykset poistetaan kiskosta irrottamalla kiskonkiinnitykset ja kohottamalla kiskoa tietyin välimatkoin noin 25 mm ilmaan. Tällöin asennuksen jälkeen kiskoon muodostuneet jännitykset vapautuvat ja kisko saavuttaa sen hetkistä lämpötilaansa vastaavan pituutensa. [34]

Jännityksistä vapaa kisko neutraloidaan eli se saatetaan sellaiseen pituuteen, joka sillä olisi neutraalilämpötila-alueella. Neutraalilämpötila-alueeksi on määritelty 17 ± 5 °C. Kun loppuhitsaus tehdään neutraalilämpötila-alueella, ovat kiskot neutraalipituudessaan. Neutraalilämpötilan alapuolella tehdyssä hitsauksessa kiskot ovat neutraalipituuttaan lyhyemmät ja ne on saatettava ennen kiinnitystä ja hitsausta neutraalipituuteensa joko lämmittämällä tai hydraulisesti vetämällä. Asennusta ei saa tehdä alle -5 °C lämpötilassa, eikä neutraalilämpötila-alueen yläpuolella. [34]

Neutraalilämpötila

Teräksen tilavuus riippuu vallitsevasta lämpötilasta. Kun lämpötila nousee, tilavuus kasvaa ja kun lämpötila laskee, tilavuus pienenee. Tätä riippuvuutta kutsutaan lämpölaajenemiseksi ja muutoksen suuruutta kuvataan lämpölaajenemiskertoimella (α), joka on teräkselle $0,0000115 \text{ mm/mm/}^\circ\text{C}$. Lämpölaajenemisen seurauksena teräksestä valmistetun rataiskun pituus riippuu lämpötilasta. Lämpötilan muutoksesta seuraava pituuden muutos voidaan laskea kaavalla [35]:

$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T, \quad (3.1)$$

jossa ΔL on pituuden muutos, α lämpölaajenemiskerroin, L_0 iskun alkuperäinen pituus ja ΔT lämpötilan muutos. Suomessa kiskojen minimilämpötilaksi on määritetty $-35 \text{ }^\circ\text{C}$ ja maksimilämpötilaksi $55 \text{ }^\circ\text{C}$. Täten lämpötilan muutos on suurimmillaan $90 \text{ }^\circ\text{C}$. Mikäli 50 m pituisen iskun lämpötila muuttuu minimistä maksimiin, kasvaa sen pituus $51,75 \text{ mm}$. Pitkä- ja lyhytkiskoraiteissa, joissa kisko jatkokset ovat sidekisko jatkoksia, tämä pituuden muutos on mahdollinen: kylmällä ilmalla jatkosraot ovat auki ja vastaavasti kuumalla ilmalla kiinni. Jatkuvakiskoraiteessa, jossa kisko jatkokset ovat hitsattuja, iskun pituus ei voi muuttua. Tästä seuraa, että kylmällä ilmalla jatkuvaksi hitsattuisko on vetojännityksen ja kuumalla ilmalla puristusjännityksen alaisena. [35] Lämpötila, jossa paikoilleen asennettuun iskoon ei kohdistu lämpöjännityksiä, on iskun neutraalilämpötila (neutral temperature (NT), stress free temperature (SFT)). Neutraalilämpötilasta poikkeavassa lämpötilassa olevaan iskoon kohdistuva lämpöjännitys voidaan laskea Hooken lain avulla [5]:

$$\sigma = E\varepsilon, \quad (3.2)$$

jossa σ on jännitys, E on Youngin moduli (iskoteräkselle $2,07 \cdot 10^5 \text{ MPa}$ [11]) ja ε on venymä. Venymä (ε) voidaan laskea alkuperäisen pituuden (L_0) ja pituuden muutoksen (ΔL) mukaan seuraavasti [5]:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (3.3)$$

tai lämpölaajenemiskertoimen (α) ja lämpötilan muutoksen (ΔT) avulla:

$$\varepsilon = \alpha \Delta T \quad (3.4)$$

Koska pituuden muutos ja siten jatkuvaksi hitsatun iskun jännityksen suuruus on riippuvainen lämpötilan muutoksesta, onisko hitsattava jatkuvaksi sellaista neutraalilämpötilaa vastaavassa pituudessa, johon nähden lämpötilan muutokset jäävät mahdollisimman pieniksi. Käytännössä tämä tarkoittaa paikallista iskun keskilämpötilaa, eli Suomessa $+10 \text{ }^\circ\text{C}$. Optimaaliseksi neutraalilämpötilaksi on Suomessa määritetty $17 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$. Se on määritetty päällysrakennelisan (Suomessa $7 \text{ }^\circ\text{C}$) verran keskilämpötilaa korkeammaksi. Hitsausmestari voi paikallisten olosuhteiden pohjalta määrittää päällysrakennelisan olevan korkeintaan kaksi astetta normaalia korkeampi tai matalampi, eli $7 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$. [34, 35]

Kaavojen 3.2 ja 3.4 avulla voidaan laskea, että Suomessa kiskoon, jonka neutraalilämpötila on 17 °C, kohdistuu -35 °C lämpötilassa 124 MPa vetoa ja 55 °C lämpötilassa 90 MPa puristusta.

Optimaalinen neutraalilämpötila määritetään todellista keskilämpötilaa korkeammaksi liian suurten puristusjännitysten välttämiseksi. Liiallinen puristusjännitys voi aiheuttaa raiteen nurjahtamisen eli niin sanotun hellekäyrän. Keskilämpötilaa korkeammalle asetettu neutraalilämpötila johtaa helpommin kiskon katkeamiseen kylmällä ilmalla liiallisen vetojännityksen johdosta. Kiskojen katkeamiset ovat kuitenkin tavallisesti hellekäyriä vähemmän vaarallisia liikenteelle. Kiskon katkeaminen on myös hellekäyriä helpompi korjata.

3.3 Jatkoshitsaus

Neutraloidut kiskot kiinnitetään pölkkyihin ja loppuhitsataan jatkuviksi. NATO 19 Jatkuvakiskoraiteet ja -vaihteet [34] määrittelee Suomessa hyväksytyiksi loppuhitsausmenetelmiksi ainoastaan lisäainetta käyttävät jatkoshitsausmenetelmät, termiitti- ja kaarijatkoshitsauksen. Tästä poiketen kiskoja hitsataan Suomessa kentälläkin myös leimuhitsauksella. Jatkoshitsausten tekijällä on oltava kyseisen hitsausmenetelmän hitsaajan pätevyys [7].

Vaikka hitsatut jatkokset ovat sidekiskojuoksiin nähden huomattavasti tasaisempia ja siten niihin ja niistä aiheutuvat dynaamiset kuormat pienempiä, ovat hitsit kaikista huolimatta epäjatkuvuuskohtia kiskossa. Hitsijatkoksen aiheuttama epäjatkuvuus on seurausta kolmesta seikasta [30]:

1. Peruskiskon, hitsin ja lämpövaikutusvyöhykkeen mekaaniset ominaisuudet kuten kovuus, lujuus ja väsymiskestävyys eroavat toisistaan.
2. Hitsausprosessin seurauksena jäännösjännitykset hitsin alueella ovat ympäristöstä poikkeavat.
3. Kiskon poikkileikkaus eroaa, etenkin termiittihitsin tapauksessa, peruskiskosta.

Korkeahiilisten terästen hitsauksessa jäähtymisnopeuteen on kiinnitettävä erityistä huomiota. Kun teräksen lämpötila on hitsatessa korkea, se on mikrorakenteeltaan austeniittia. Teräksen koostumuksesta riippuen austeniitti on stabiilia noin 730 °C asti. Tämän alapuolella riittävän hitaalla jäähtymisnopeudella austeniitti hajaantuu perliitiksi eli ferriitin ja sementiitin seokseksi. Mikäli jäähtymisnopeus on liian suuri, austeniitin hajaantumisen ei ole edellytyksiä ja tuloksena syntyy hiiliyliyllästeistä ferriittia eli martensiittia. Kriittinen jäähtymisnopeus, jota nopeammalla jäähtymisellä martensiittia syntyy, riippuu teräksen kemiallisesta koostumuksesta. Siten eri teräslaaduilla on erilaiset vaatimukset jälkilämmitykselle. [1] Lämpötila-alue, jossa faasimuutokset tapahtuvat on 700 – 400 °C ja siten jäähtymisnopeuden kontrollointi juuri tällä alueella on ensiarvoisen tärkeää [30].

Kun kaksi profiililtaan erilaista kiskoa hitsataan yhteen, käytetään niiden välissä tavallisesti liityntäkiskoa eli kiskoa, jonka toinen pää vastaa toisen liitettävän kiskon profiilia ja toinen toisen kiskon profiilia. Profiilit 60 E 1 ja 54 E 1 on mahdollista liittää

toisiinsa termiittihitsaamalla, mikäli käytetään tarkoitukseen suunniteltua termiittihitsiä. [26]

Seuraavassa käsitellään termiitti-, leimu- ja kaarijatkoshitsausta. Nykyisin Suomessa radalla tehtävistä jatkoshitseistä suurin osa on termiittihitsejä. Kaarijatkoshitsaus on aiemmin ollut merkittävä jatkoshitsausmenetelmä, mutta nykyisin sitä tehdään enää poikkeustapauksissa. Suomessa leimuhitsataan kiskoja radalla suurempien kiskotus- töiden yhteydessä yhden kiskonhitsauskoneen voimin.

3.3.1 Termiittijatkoshitsaus

Termiittihitsausta on käytetty Yhdysvalloissa rata- kisko- jen liittämiseen jo 1930- luvulta lähtien. Se on sulahitsausmenetelmä, jossa kaksi metallikappaletta liitetään toisiinsa aluminoterminen reaktion tuottaman lämmön ja lisäaineen avulla. Aluminotermissessä reaktiossa rautaoksidin ja metallinen alumiini reagoivat eksotermisesti (lämpöä tuottaen) keskenään tuottaen metallista rautaa ja alumiinioksidia. [36] Termiittiseos sisältää rautaoksidin ja alumiinin lisäksi lisäaineita, joilla on mahdollista vaikuttaa syntyvän hitsin kemialliseen koostumukseen ja mekaanisiin ominaisuuksiin. Lisäaineet ovat termiittiseoksessa rautaseospelletteinä, joiden tehtävänä on seostamisen lisäksi jäähdyttää reaktiota. Sopivan pellettimäärän ansiosta reaktion lämpötila laskee jäähdyttämättömän reaktion 3090 °C:sta noin 2450 °C:een. Liiallisella pellettiseostuksella reaktion lämpötila voi laskea alle 2040 °C:n, jonka alapuolella hitsauksen onnistumisen kannalta välttämätöntä metallisulan ja kuonan erottumista ei välttämättä tapahdu. [36] Termiittihitsiä ei saa valmistaa sellaiseen kiskonpäähän, jossa on sideruuvireikä alle 100 mm päässä kiskon päästä [7].

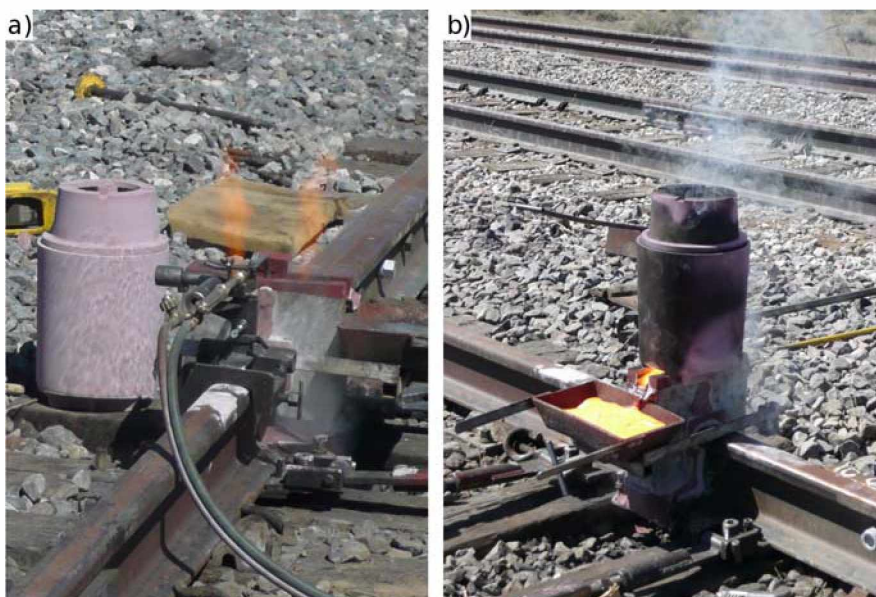
Termiittihitsaus tapahtuu kuudessa päävaiheessa:

1. Ensimmäisessä vaiheessa hitsirako valmistetaan joko asettamalla hitsattavat kiskot sopivalle etäisyydelle toisistaan tai leikkaamalla kiskoon sopivan kokoinen rako [37]. Hitsausraon suuruus riippuu käytettävästä termiittihitsausmenetelmästä, mutta se on yleensä noin 25 mm. Hitsiraon onnistuneen valmistamisen takaamiseksi kisko- jen päät esioikaistaan korkeus- ja sivusuunnassa ensin jalakaosasta, jonka jälkeen kiiloilla ja sivuoikaisu- riveillä korjataan hamaran ristikkyy- s. Kulkupinnassa (ks. kuva 5.1) ristikkyy- s saa suurim- millaan olla 1 mm, kulkureunassa 0,5 mm. [38]

Rako voidaan valmistaa joko polttoleikkaamalla, laikkakatkaisukoneella tai sahaamalla. Mikäli rako valmistetaan polttoleikkaamalla, on päiden hitsaus tehtävä välittömästi. [7] Nykyisin hitsattavia kisko- jen päitä ei tulisi polttoleikata, sillä polttoleikattuihin kiskon päihin valmistettujen hitsien laatu voi olla heikko.

Onnistuneen hitsin takaamiseksi hitsattavat pinnat ja muotin ulottuma- alueet on puhdistettava leikkaushilseestä ja -kuonasta sekä muusta liasta [36, 38]. Erityisesti ruoste ja valssaushilse keräävät itseensä kosteutta ja voi- vat aiheuttaa huokosia valmistettavaan hitsiin. Puhdistamisen jälkeen tarkis- tetaan kiskonpäiden ylikorotus ja sivuoikaisu. Ylikorotus mitataan metrin vii- vaimella, puolen metrin päästä hitsin molemmilta puolilta. Termiittihitsauk- sessa sen tulisi olla 1,5 – 2,5 mm. Mikäli ylikorotusta ei tehdä, painuu hitsi jäähtymisen seurauksena vaakataso- n alapuolelle.

2. Toisessa vaiheessa hiekasta valmistetut tulenkestävät muotit asetetaan kiskon sivuille paikoilleen, kiristetään yleiskiinnityslaitteella vastakkain ja tiivistetään tiivistyshiekalla kiskoon kiinni [37, 38].
3. Kolmannessa vaiheessa kiskonpää esilämmitetään happi-propaani - esilämmityspolttimella noin 1000 °C lämpötilaan (Kuva 15a) [38]. Kiskon päiden oikea ja tasainen lämpötila on tärkeää onnistuneen hitsin kannalta [36].
4. Neljännessä vaiheessa muotin ylle sijoitettava upokas kuivataan lämmittämällä se yli 100 °C lämpötilaan. Tämän jälkeen upokas täytetään termiittianoksella. Kun kolmannen vaiheen esilämmitys on valmis, sijoitetaan upokas muotin päälle ja termiittiannos sytytetään tarkoitukseen sopivalla sytytyksellä. Kun termiittireaktio on edennyt riittävän pitkälle, alumiinikuona alkaa nousta teräksen pinnalle ja seos on valmista valettavaksi. [38] Menetelmästä riippuen valu alkaa oikealla hetkellä automaattisesti tai se aloitetaan avaamalla upokkaan pohjasta valureikä lyömällä laukaisunasta paikoiltaan [37, 38]. Ensimmäisenä upokkaasta valuu teräs, joka täyttää hitsattavan raon. Tämän perässä seuraa alumiinioksidikuona, joka valuu muotin viereen sijoitettuun kuonapannuun (Kuva 15b).



Kuva 15 a) Kiskon päiden esilämmitys happi-propaanipolttimella. b) Valettu termiittihitsi. Kuonapannussa on keltaisena hehkuvaa kuonaa.

5. Viidennessä vaiheessa hitsausmenetelmästä riippuvan jäähtymisajan jälkeen muotin yläosa poistetaan ja ylimääräinen materiaali kuumatyöstetään irti kiskon hamarasta hydraulisella kuumatyöstölaitteella (Kuva 16) tai paineil-mataltalla [37, 38].
6. Kuudennessa vaiheessa tehdään hitsin jälkityöt. Kiskon vielä ollessa työlämpötilassa kulkupinta hiotaan lähes profiilin tasoon ja hamaran ulkoreunaan lyödään hitsaajan numero. Kun valusta on kulunut yli tunti, kiilat poistetaan ja valutapit katkaistaan. Lisäksi hitsin kutistumisjännitysten tasaamiseksi kiskon kiinnitykset irrotetaan kymmenen pölkyn matkalta hitsin kummaltakin

puolelta. Kun kisko on jäähtynyt, tehdään viimeistelyhionta kiskon saattamiseksi tarkasti haluttuun profiiliin. [38] Kuvassa 17 on esitetty kiskossa oleva termiittihitsi.



Kuva 16 Hydraulinen kuumatyöstölaite.



Kuva 17 Termiittihitsi kiskossa.

Suomessa tehdään tällä hetkellä sekä SKV- (Schweissen mit kurzer Vorwärmung) että SoWoS- (Schweissen ohne Wulst und ohne Stegeinlauf) termiittihitsauksia. SKV-menetelmässä esilämmitysaika on lyhyt, noin 1 – 2 minuuttia. SoWoS-menetelmässä tarvitaan SKV:hen nähden pidempi esilämmitysaika, mutta hitsiin tarvittava termiittimäärä on pienempi ja menetelmä siten edullisempi [39]. Suomessa käytössä olevilla menetelmillä voidaan täyttää noin 25 mm hitsausrako. Erityisesti kiskon murtumien korjaukseen on kehitetty leveärakotermiittihitsaus, jolla voidaan täyttää 48 – 80 mm rakoja [39].

Valmiin termiittihitsin mikrorakenne vastaa tyypillistä, melko karkearakeista valurakennetta. Hitsausteknisten ohjeiden [38] mukaan valetun termiittiteräksen kovuuden

tulisi olla noin 30 HB peruskiskoa suurempi hitsin kulumisen ja kulkupinnan epäjatkuvuuden minimoimiseksi. Lämpökäsiteltyjen teräslaatuojen hitsaukseen on käytettävä termiittiseoksia, jotka voidaan hitsauksen jälkeen lämpökäsitellä [31].

3.3.2 Leimuhitsaus

Leimuhitsaus on vastushitsausmenetelmä, jolla tuotetaan päittäisliitoksia [40]. Leimuhitsauksella saavutetaan tasalaatuinen liitos, jonka mikrorakenne vastaa enemmän taottua kuin valettua mikrorakennetta. Termiittihitsaukseen verrattuna leimuhitsauksella saavutetaan paremmat mekaaniset ominaisuudet, esimerkiksi hitsin väsymislujuus vastaa paremmin perusaineen lujuuutta.

Leimuhitsaukseen kuuluu kolme päävaihetta: esilämmitys, leimutus ja puristus [41]. Vanhoille kiskoille, joiden päät voivat olla epätasaisia, voidaan ennen esilämmitystä tehdä myös esileimutus [31]. Esileimutuksessa hitsattavat kiskojen päät tuodaan vastakkain ja niiden läpi johdetaan sähkövirta, joka synnyttää pintojen välille valokaaria ja tasoittaa pinnat vastaamaan paremmin toisiaan [41].

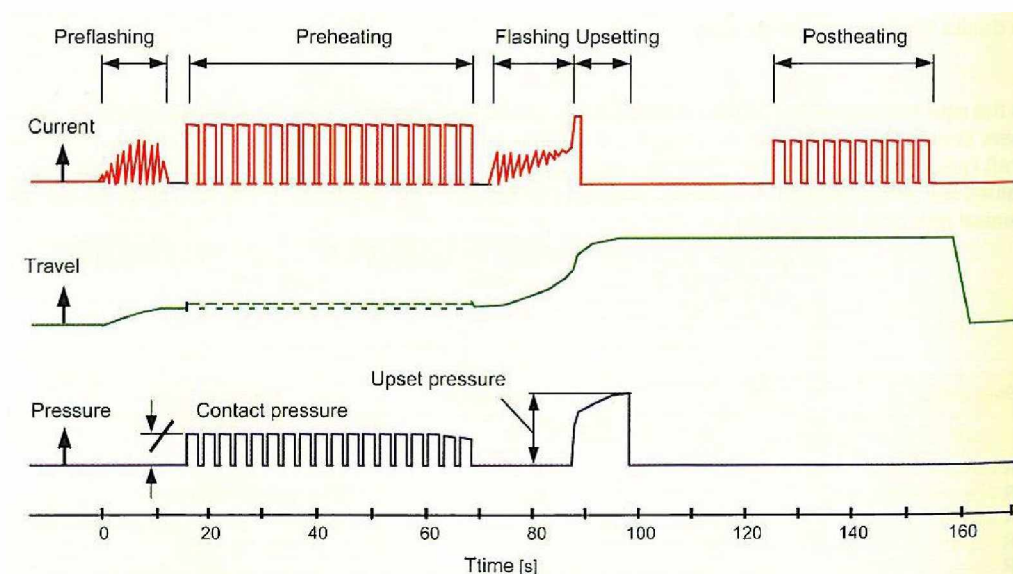
Esileimutuksen jälkeen kiskojen päät esilämmitetään tuomalla ne hetkellisesti vastakkain 20 – 40 kertaa. Hetkellisen kosketuksen aikana päiden läpi johdetaan suuri sähkövirta, joka aiheuttaa päiden lämpenemisen [31]. Esilämmityksessä käytetyn puristusvoiman on oltava riittävän alhainen, jotta päät eivät hitsaudu yhteen, mutta kuitenkin riittävä, jotta leimuamista ei tapahdu [41].

Kun kiskojen päät ovat saavuttaneet halutun lämpötilan, aloitetaan leimutus. Sen aikana kiskojen päitä tuodaan kiihtyvästi toisiaan vasten ja sähkövirtaa kasvatetaan. Leimutuksella pyritään muodostamaan riittävästi lämpöä pintojen plastisoimiseksi. Kun riittävä määrä materiaalia on plastisoitunut, tyssätään kiskojen päät voimakkaasti yhteen ja leimuamisvirta katkaistaan. [41] Tyssäyksen seurauksena hitsiin syntyy pieni, pääasiassa oksideista koostuva purse [40]. Purse poistetaan hydraulisella kuumatyöstölaitteella. Jäähtyneen hitsin hamara hiotaan kulkureunan ja -pinnan osilta vaadittuihin toleransseihin. Leimutuksessa oikeansuuruisen jännitteen valinta on tärkeää, sillä liian alhaisella jännitteellä leimuamista ei tapahdu ja liian korkealla jännitteellä hitsattaville pinnoille muodostuu kraatereita [40]. Ratakiskojen leimuhitsauslaitteissa virta on tavallisesti 40 000 – 100 000 A ja jännite 6 – 15 V [31]. Kuvassa 18 on esitetty valmis leimuhitsi.



Kuva 18 Leimuhitsi kiskossa.

Kuvassa 19 on esitetty leimuhitsausprosessin periaate sähkövirran, kiskonpäiden kulke-
keman matkan ja päiden yhteen puristavan voiman avulla.



Kuva 19 Leimuhitsausprosessin periaate [17]

Erikoislaatuksille, kuten lämpökäsitellyille kiskoteräksille tehdään jälkilämmitys ta-
saisella tai pulssivirralla jäähtymisnopeuden hidastamiseksi ja siten hauraiden mikro-
rakenteiden syntymisen estämiseksi. Uudemmissa leimuhitsauslaitteissa on mahdol-
lisuus tehdä myös jälkityssäys, jolla pyritään muokkauslujittamaan hitsiä ja siten pa-
rantamaan sen mekaanisia ominaisuuksia. [31]

3.3.3 Kaarijatkohitsaus

Kaarijatkohitsaus tarkoittaa Suomessa rautateiden yhteydessä puikkohitsausta [7].
Esimerkiksi Saksassa myös MAG- ja täytelankahitsauksen käyttö ovat rajallisesti
mahdollisia [31]. Kaarijatkohitsauksen käyttäminen on nykyisin yhä mahdollista,
mutta termiitti- ja leimuhitsaus ovat käytännössä syrjäyttäneet sen lähes kokonaan.

Kaarijatkohitsauksessa hitsirako valmistetaan samoin kuin termiittihitsauksessa.
Hitsiraon suuruus on noin 15 mm ja käytettävä ylikorotus 2 – 3 mm. Jatkohitsaus
aloitetaan kiskon jalasta, joka hitsataan kuparista juuritukea vasten hitsausjauhetta
apuna käyttäen. Kun jalkaosa on valmis, juurituki poistetaan ja tilalle asennetaan ku-
parinen varsimuotti. Varsi hitsataan yhtäjaksoisesti hamaraan saakka, joka hitsataan
palko kerrallaan. Onnistuneen hitsin takaamiseksi hitsattavien kiskon päiden on koko
hitsauksen ajan oltava sopivassa työlämpötilassa. Lisäksi kuonanpoisto on tehtävä
tarkasti, jottei hitsiin jää kuonansulkeumia. [38]

Hitsauksen jälkeen kisko lämmitetään metrin matkalta noin 100 °C lämpötilaan, muo-
tit poistetaan ja hitsi tarkastetaan. Jatkohitsin kulkupinta- ja reuna hiotaan työläm-
pötilassa lähes profiilin tasoon ja hitsaajan tunnus leimataan hamaran ulkoreunaan.
Hitsi on suojattava liian nopealta jäähtymiseltä joko jäähtymissuojalla tai jälkilämmi-
tyksellä. Hitsin kutistumisjännitykset vapautetaan irrottamalla kiskojen kiinnitykset
kymmenen pölkyn matkalta hitsin molemmilta puolilta. Kun hitsi on jäähtynyt, teh-

dään viimeistelyhionta, jolla hitsi muotoillaan lopulliseen profiiliinsa. [38] Kuvassa 20 on esitetty kaarijatkoshitsi.



Kuva 20 Kaarijatkoshitsi kiskossa.

3.4 Valmiin jatkoshitsin tarkastus

Suomessa jatkoshitsien suoruus sekä pintapuolinen ja sisäinen kunto tarkastetaan viimeistelyhionnan jälkeen. Hitsin suoruus tarkastetaan suorasärmää käyttäen. Hitsien suoruus mitataan 1 m mittakannalla. Kulkupinnan toleranssit ovat $-0,0 - +0,6$ mm. Kulkureunan toleranssit ovat $-0,3 - +0,0$ mm. Hitsin pintapuolinen kunto arvioidaan silmämääräisesti. Hitsin sisäisten virheiden löytämiseksi sille tehdään ultraäänitarkastus.

4 Kiskoon kohdistuvat rasitukset

Jatkuvakiskoraiteessa oleva kisko altistuu käyttöikänsä aikana niin liikenteen kuin ympäristönkin rasituksille. Molemmista tekijöistä kohdistuu kiskoon jännityksiä. Jännitysten lisäksi ympäristö voi rasittaa kiskoa myös kemiallisesti esimerkiksi veden tai suolan muodossa. Liikenteen ja ympäristön yhteisvaikutus johtavat kiskon kunnan heikkenemiseen.

Jatkuvaksi hitsattuun kiskoon kohdistuvat jännitykset voidaan jakaa seuraavasti niiden aiheuttajan mukaan:

- Pyörän kuormituksen aiheuttamat jännitykset.
- Kiskon lämpölaajenemisen aiheuttamat jännitykset.
- Jäännösjännitykset.

Kiskon päällä kulkeva pyörä kohdistaa kiskoon pysty- ja vaakasuuntaisia voimia sekä liukuvoimia. Pystysuora voima koostuu [42]:

- Staattisesta tekijästä eli junan painosta
- Dynaamisesta tekijästä, joka on seurausta liikkuvan kaluston pystysuuntaisesta liikkeestä vaihtelevan raidegeometrian mukana
- Mahdollisesta iskumaisesta tekijästä, joka on jonkin kiskossa tai pyörässä olevan lyhyen epäjatkuvuuskohdan, kuten kiskojohtoksen tai pyörän loven aiheuttama voima.

Täten varsinainen pystysuora kuormitus on kolmen edellisen tekijän summa, jonka seurauksena rataan kohdistuva kuormitus voi olla huomattavasti nimellistä kuormaa suurempi. Kiskoon vaikuttavat pystysuuntaiset voimat aiheuttavat kiskon taipumisen kahden pölkyn välillä. Tällöin kiskon alapintaan kohdistuu voiman kohdalla vetojännitys. Mikäli kiskoon kohdistuva pystysuuntainen voima kohdistuu kiskon hamaran keskilinjan viereen, vääntää se kiskoa, jolloin kiskon varteen muodostuu pystysuuntainen vetojännitys. [42]

Kiskoihin kohdistuu sivusuuntaisia voimia pääasiallisesti pyörien laippakosketuksesta. Kohtuullisen tiukoissa kaarteissa (kaarresäde 600 – 800 m) laippakosketuksen aiheuttama sivusuuntainen voima pysyy koko kaartein ajan kohtuullisen vakiona. Loivemmissa kaarteissa ja suoralla radalla mahdollisesti tapahtuva liikkuvan kaluston epästabili liike voi vuorostaan aiheuttaa suuria sivusuuntaisia dynaamisia kuormia. Kiskoon vaikuttavat sivusuuntaiset voimat siirtävät hamaraa suhteessa kiskon jalkaan ja aikaansaavat pystysuuntaisen vetojännitystilän kiskon varteen. Taivutusjännitysten lisäksi pyörän kuorma aiheuttaa kiskoon leikkausjännityksiä. [42]

Kiskon ja pyörän kosketuskohdassa tapahtuu materiaalin elastisen muodonmuutoksen myötä osittaisluistoa, jolloin osa kosketuskohdasta pitää ja osa luistaa. Osittaisluistosta aiheutuu kiskon pintaan liukuvoimia. Luistoa tapahtuu pitkittäis- ja poikittaissuunnassa. Osittaisluistoa tapahtuu pitkittäisessä suunnassa erityisesti, kun pyörät vetävät tai jarruttavat voimakkaasti. Poikittaissuuntaista osittaisluistoa tapahtuu esimerkiksi kaarteissa. [42] Kun kiskon pintaan kohdistuu riittävän suuri normaali- ja liukuvoima, muokkautuu se plastisesti. Toistuva plastinen muodonmuutos voi materiaalin väsymisen tai muokkautumiskyvyn ehtymisen myötä johtaa vierintäväsymissä-

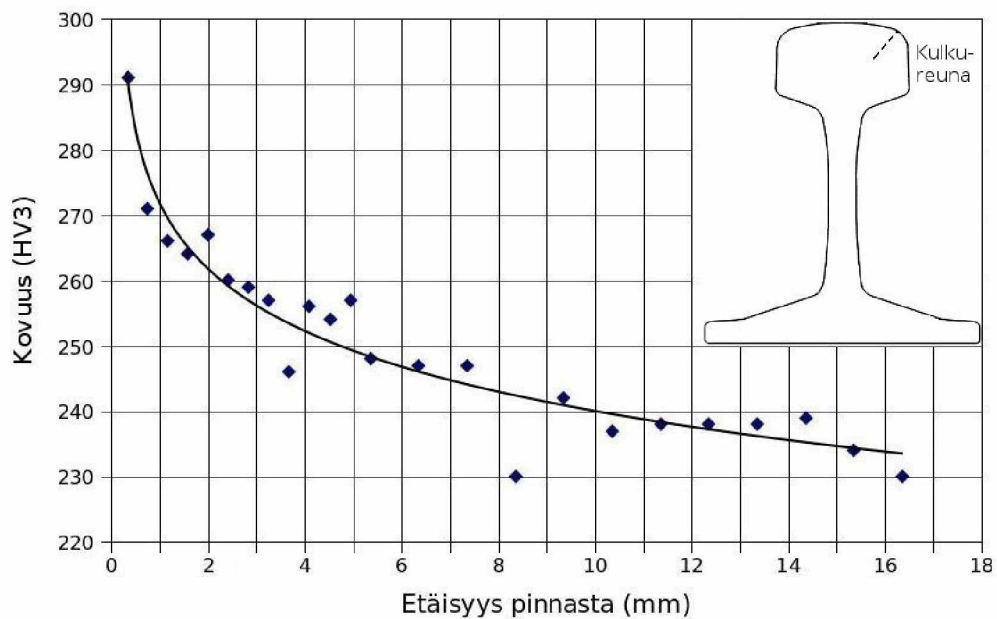
röjen syntymiseen. [43] Siten kiskon pintaan kohdistuvilla liukuvoimilla on merkittävä rooli kiskon kulumisessa sekä vierintäväsäilymisessä (ks. luku 5.1.6) [44].

Kuten edellisessä luvussa kuvattiin, kiskon pituus riippuu vallitsevasta lämpötilasta. Jatkovaksi hitsatun kiskon yhtenäisen luonteen vuoksi se ei voi muuttaa pituuttaan lämpötilan muuttuessa. Täten, kun kiskon lämpötila poikkeaa neutraalilämpötilasta, aiheutuu kiskoon tietyn suuruinen pituussuuntainen jännitys. Lämpötilan ollessa neutraalilämpötilan yläpuolella kiskoon vaikuttaa puristusjännitys. Neutraalilämpötilan alapuolella kisko on vetojännityksen alaisena. [35]

Jännityksiä, jotka vallitsevat kappaleessa ilman ulkoista voimaa, kutsutaan jäännös-jännityksiksi. Kiskoihin muodostuu jäännösjännityksiä valmistuksen ja hitsauksen aikana. Rullaoikaistuksessa kiskossa (ks. luku 2.2.4) hamara ja jalka ovat tavallisesti vetojännityksen ja varsi puristusjännityksen alaisia. Hitsin lähellä jäännösjännitys- ja kauma on puolestaan päinvastainen. Liikenteen myötä kiskon pinta muokkautuu plastisesti noin 4 – 10 mm syvyydeltä, jonka seurauksena siihen muodostuu puristusjännitys. [45]

Pyörän ja kiskon välisen kosketuskohdan muoto riippuu pyörän ja kiskon profiileista sekä kontaktin paikasta. Kosketuskohta on tavallisesti ellipsin muotoinen, esimerkiksi noin 10–12 mm pituinen ja noin 5–8 mm levyinen [42]. Koska kontaktikohta on hyvin pieni junan painoon nähden, muodostuu jännitys kontaktissa suureksi. Korkein jännitys kontaktikohdassa on luokkaa 1000 – 2000 MPa [17]. Tämän seurauksena materiaali muokkautuu kontaktikohdassa plastisesti. Muokkautumisen myötä materiaali muokkauslujittuu eli sen lujuus ja kovuus nousevat. Samalla materiaalin sitkeys alenee. Muokkauslujittuneen kerroksen syvyys riippuu muun muassa kiskon teräslaadusta ja radalla liikennöivän kaluston akselipainoista. Zakharovin [46] mukaan muokkauslujittuneen kerroksen paksuus on tavallisesti luokkaa 4 – 8 mm.

Kuvassa 21 on esitetty Suomessa käytössä olleen kiskon kovuusprofiili etäisyyden funktiona kiskon pinnasta. Kovuusprofiili on mitattu kiskon poikkileikkauksesta, kuvassa katkoviivalla osoitetulta kohdalta. Kovuus on mitattu Vickers-kovuutena Duramin A-300 -kovuusmittauslaitteella 3 kg kuormaa käyttäen. Kuvasta nähdään, että lähimpänä pintaa oleva materiaali on kovinta eli se on muokkautunut eniten. Koska muokkauslujittunut kerros on perusmateriaalia kovempaa ja siinä vallitsee puristusjännitys, se on perusmateriaalia vastustuskykyisempi kulumista sekä säröjen muodostumista ja kasvua vastaan.



Kuva 21 3 kg:n kuormalla mitattu Vickers-kovuusprofiili kiskon poikkileikkauksesta, kuvassa katkoviivalla osoitetulta kohdalta.

Kiskoon kohdistuvat jännitykset superponoivat eli toimivat yhdessä päällekkäin. Täten esimerkiksi kylmällä ilmalla kiskoon vaikuttava vetojännitys pyrkii avaamaan poikittain kiskossa kasvavia säröjä, kun taas kiskon pintaan muodostunut puristusjäännitys pyrkii sulkemaan niitä.

Pyörien kiskoon kohdistamat voimat riippuvat pääasiassa liikkuvan kaluston ominaisuuksista, kuten akselipainosta, liikennöinti nopeudesta ja telin rakenteesta. Suurempi akselipaino ja liikennöinti nopeus kasvattavat kiskoon kohdistuvia voimia. [17] Radan kaarregeometriaan nähden väärän jäykkyyksinen teli aiheuttaa suuria sivuttaisvoimia. Telin jousittamaton massa vaikuttaa vuorostaan muun muassa iskumaisten voimien suuruuteen [17]. Pyörien ja kiskon profiileilla on suuri vaikutus liikkuvan kaluston ohjautuvuuteen ja sen kautta kaluston kiskoon kohdistamiin voimiin [47]. Suuremmat kiskoon kohdistuvat voimat johtavat nopeampaan vikojen ydintymiseen ja kasvuun.

Vaikka kiskoon kohdistuvat jännitykset ovat kiskon murtolujuutta alhaisempia, voivat ne toistuessaan riittävän monesti synnyttää kiskoon väsymissäröjä. Väsymisellä tarkoitetaan materiaalin murtumista toistuvan tai vaihtuvan kuorman alaisuudessa. Jännitys, joka materiaalin väsymiseen vaaditaan, on tavallisesti huomattavasti materiaalin myötölujuutta alhaisempi. [5] Mikäli materiaalissa on jännityskeskittymiä, kuten oksidisulkeumia tai säröjä, keskittyy jännitys näihin kohtiin ja väsymissärö voi ydintyä.

5 Kiskon vikaantuminen

Tässä luvussa kerrotaan yleisesti millaisia vikoja kiskoissa esiintyy. Luku on jaettu alalukuihin vikojen esiintymispaikkojen mukaan hamarassa, varressa, jalassa ja hitsissä esiintyviin vikoihin. Viimeinen alaluku käsittelee kiskojen vikaantumista Suomessa kiskovikatilastojen pohjalta.

Yleisesti kiskojen viat voidaan jakaa kolmeen ryhmään niiden aiheuttajan mukaan [43]:

1. Viat, jotka syntyvät kiskon valmistusvirheistä.
2. Viat, jotka syntyvät virheellisestä käsittelystä, asennuksesta tai käytöstä.
3. Viat, jotka syntyvät materiaalin toistuvasta kuormituksesta.

Ensimmäisen ryhmän, kiskon valmistusvirheistä johtuvien vikojen määrä on luonnollisesti riippuvaista valmistuksen laadusta. Nykyisin käytössä olevilla valmistusmenetelmillä on mahdollista valmistaa hyvin sulkeumista puhdasta ja tasalaatuista terästä, joten uusimmissa kiskoissa näiden vikojen osuus on melko alhainen. Kuitenkin Suomessa, jossa käytössä olevat kiskot ovat peräisin usealta eri vuosikymmeneltä, kiskovikatilastoissa esiintyy vielä huomattavasti valmistusvirheiden aiheuttamia vikoja.

Suomessa suurin osa toiseen, virheellisestä käsittelystä, asennuksesta tai käytöstä johtuvien vikojen ryhmään kuuluvista vioista on ympärilyöntijälkiä. Virheellisestä asennuksesta, kuten huonosta hitsistä seuraavat viat ovat määrällisesti ympärilyöntijälkiä vähäisempiä, mutta tavallisesti liikenteelle haitallisempia.

Kolmannen ryhmän viat ovat seurausta materiaalin toistuvan kuormituksen aiheuttamasta väsymisestä. Vierintäväsymisvaurioiden syntymiseen ei tavallisesti liity materiaalivirheitä eikä termisiä tai mekaanisia vaurioita. Vika on seurausta teräksen käyttömyydestä kestää siihen kohdistettua kuormitusta. [43]

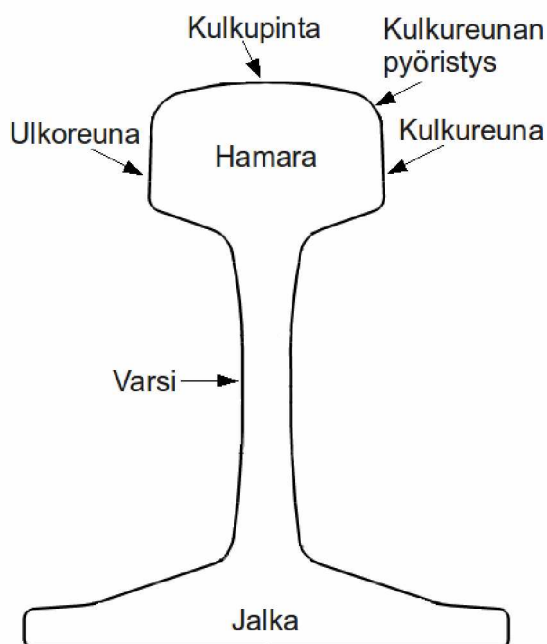
Varsinaisen vikaantumisen ohella kiskojen liiallinen kuluminen tai korroosio voivat rajoittaa kiskon käyttöikä.

Suomessa viat jaetaan niiden vakavuuden mukaan vikaluokkiin. Tarkastuksessa havaitut viat, jotka eivät edellytä toimenpiteitä, ovat luokan 3 vikoja. Viat, jotka tulee korjata, luokitellaan korjauksen kiireellisyyden mukaan luokkiin 2, 2/1 ja 1. Taulukossa 7 on esitetty vikaluokkien määritelmät sekä ajat, joiden kuluessa viat on poistettava.

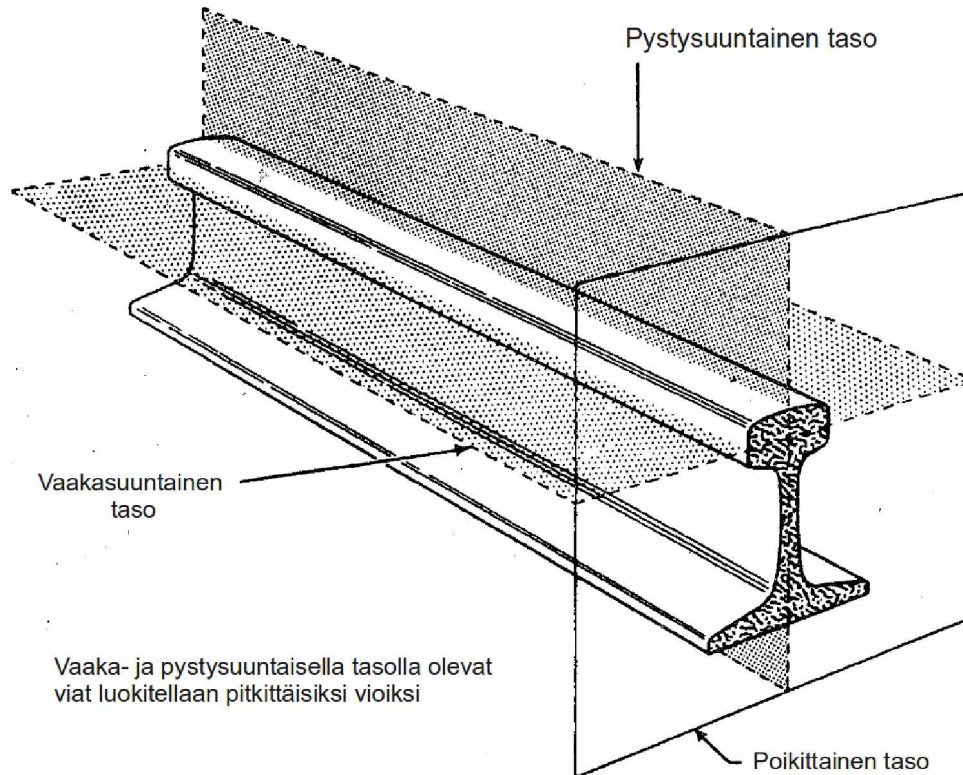
Taulukko 7 Suomessa käytössä oleva vikojen vakavuuden luokittelu [48].

Vika-luokka	Vikojen kuvaus	Toimenpiteet
1	Murtumat tai viat, jotka aiheuttavat suurella todennäköisyydellä suistumisen tai liikennehaitan.	Kunnossapitäjän on poistettava viat välittömästi; liikennöinti on lopetettava tai sitä on rajoitettava kunnes vika on korjattu.
2/1	Viat, jotka kiskon lämpötilan voimakkaan laskun tai vaihtelun vuoksi aiheuttavat todennäköisesti murtumavaaran tai liikennehaitan	Viat on poistettava ennen talvea; tarvittaessa kunnossapitäjä asettaa liikenne-rajoituksia.
2	Viat, jotka todennäköisesti aiheuttavat liikennehaitan ja jotka kokemusperäisesti kestävät yli seuraavan talven, mutta eivät sitä seuraavaa kylmää kautta	Kunnossapitäjän tulee poistaa viat seuraavan kunnossapitotyön yhteydessä, kuitenkin ennen seuraavaa ultraäänitarkastusta.
3	Vauriot ja viat, jotka kokemusperäisesti eivät johda murtumaan eivätkä aiheuta liikennehaittoja ja jotka kasvavat hyvin hitaasti	Pintaviat poistetaan rataosuuksittain kunnossapitotyönä. Muiden vikojen kasvamista tarkkaillaan.

Tarkastuksissa havaitut viat luokitellaan vakavuuden lisäksi myös vian tyypin mukaan. Suomessa käytössä oleva vikojen tyyppiluokittelu perustuu UIC:n määrelehteen 712 [49]. Siinä viat luokitellaan 3- tai 4-numeroisilla koodeilla vian esiintymispaikan ja tyypin mukaan. UIC:n luokittelu määrittelee muun muassa onko vika lähellä kiskonpäättä, päätyalueen ulkopuolella tai hitsissä. Luokittelusta ilmenee myös, onko vika kiskon hamarassa, varressa tai jalassa. Kuvassa 22 on esitetty kiskon poikkileikkauksen eri alueet. Osa vioista on orientoinut tietyllä tavalla kiskoon nähden. Näitä orientaatioita kuvataan kuvassa 23 olevilla tasoilla.



Kuva 22 Kiskon eri alueiden nimitykset.



Kuva 23 Vaaka-, pysty- ja poikkisuuntaisten tasojen orientaatiot kiskossa [12].

5.1 Viat kiskon hamarassa

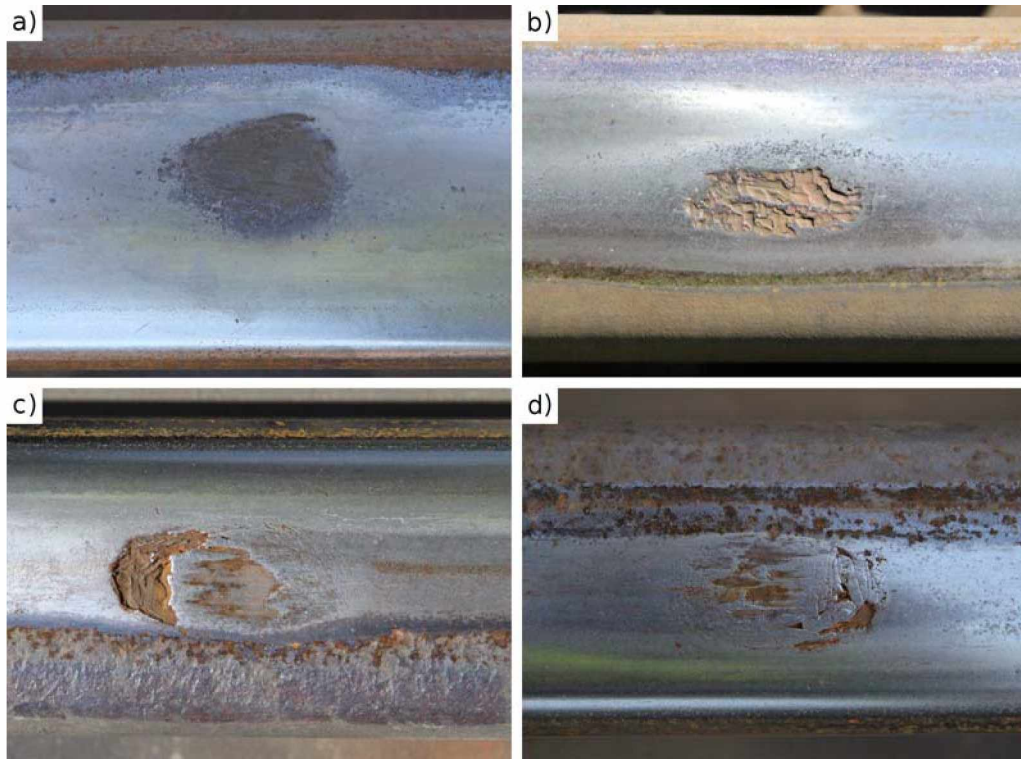
Kiskon hamarassa esiintyvät viat ovat joko kulkupinnassa esiintyviä tai kiskon hamaran sisäisiä vikoja. Kulkupinnassa esiintyviä vikoja ovat ympärilyöntijäljet, kulkupinnan lävistymä, kuluneisuus, korrugaatio, pintaviat, vierintäväsyminen ja squat-viat. Pintavikoja lukuun ottamatta kulkupinnassa esiintyvien vikojen muodostuminen ei tavallisesti ole kytköksissä materiaalivirheisiin. Hamaran sisäiset viat sen sijaan ydintyvät tavallisesti olemassa oleviin jännityskeskittyymiin, kuten oksidisulkeumiin. [43]

5.1.1 Ympärilyöntijäljet

Junan vetävät pyörät ympärilyövät, kun niistä loppuu pito. Tämän seurauksena ohut kerros kiskon pinnasta kuumenee voimakkaasti muuttuen austeniitiksi ja äkillisesti jäähtyessään karkenee muodostaen kovaa ja haurasta martensiittia. Raskaasti liikennöidyillä linjoilla kareneen kerroksen paksuus voi pahimmillaan olla jopa 4 – 6 mm [44], tavallisemmin kerros jää kuitenkin alle 1 mm paksuiseksi [9]. Ympärilyöntijäljet esiintyvät yleisimmin samalla kohtaa sekä oikeassa että vasemmassa kiskossa [17]. Kuvassa 24a – d on esitetty eriasteisia ympärilyöntijälkiä kiskossa.

Pääasiallisia syitä vetävien pyörien ympärilyömiseen ovat jyrkät ylämäet, kaluston liiallinen kiihdytys tai riittämätön vetovoima kuormaan nähden sekä kiskojen pinnan kontaminoituminen, jonka seurauksena pyörän ja kiskon välinen kitka voi laskea riittämättömälle tasolle. Kitka voi alentua esimerkiksi kiskoilla olevien lehtien tai voiteluaineen myötä [44]. Myös sadevesi ja lumi alentavat kitkaa [50]. Stonen et al. [44] mukaan sade aiheuttaa kitkan haitallista alenemista, mikäli kiskoille on pitkän kuivan kauden jälkeen päässyt kerääntymään esimerkiksi siitepölyä, joka yhdessä vähäisen

sadeveden kanssa muodostaa kiskon pinnalle liukkaan kalvon. Kuitenkin jos sade on voimakasta, puhdistaa se kiskon pinnan ja kitka palautuu tyydyttävälle tasolle.



Kuva 24 a – d) Eriasteisia ympärilyöntijälkiä kiskossa.

Ympärilyöntijäljet luokitellaan yksittäisiksi tai toistuviksi ympärilyöntijäljiksi. Yksittäinen ympärilyöntijälki on ulkonäöltään elliptinen jälki kiskon pinnassa. Kiskon pintaan syntynyt karennut kerros voi liikenteen myötä joko hävitä tai kehittyä. Kehittyminen voi edetä kiskossa vaaka- tai poikittaissuunnassa. Vaakasuntainen kehittyminen johtaa kareneen kerroksen irti sälöilemiseen ja sen myötä kulkupinnan madaltumiseen. Tällöin itse vika ei kuitenkaan kasva syvyysuunnassa. Mikäli vika kehittyi poikittaissuunnassa, ydintyy hamaraan sisäinen, kiskon vartta kohti kasvava särö, joka lopulta johtaa kiskon katkeamiseen. Sisäinen särö ilmenee kiskon ulkopuolella ainoastaan pienenä painumana kiskon pinnassa. [17, 49] Mikäli karennut kerros ei ole ehtinyt kehittyä, on se mahdollista poistaa kiskonhionnalla. Pidemmälle edenneitä vaurioita on mahdollista korjata esimerkiksi päällehitsaamalla. Kiskojen kunnossapidosta kerrotaan tarkemmin luvussa 6.

Yksittäinen ympärilyönti ei siis itsessään ole radan turvallisuutta vaarantava vaurio, vaan vasta kehityttyään siitä voi seurata todellista haittaa. Täten ympärilyöntijälkien tarkkaileminen on tärkeää.

Toistuvia ympärilyöntijälkiä esiintyy radan kohdilla, joilla pyörät ympärilyövät toistuvasti. Kuvassa 25 on esitetty toistuvien ympärilyöntien tuottama jälki kiskossa. Toistuvat ympärilyönnit aiheuttavat kiskon kulkupintaan peräkkäisiä, pieniä mutta syviä säröjä, jotka toimivat murtuman ydintäjinä ja voivat etenkin kylmässä johtaa kiskon murtumaan. Toistuvien ympärilyöntien seurauksena kiskon pinta voi omaksua aalto-maisen muodon. Mikäli vaurio ei ole edennyt liian pitkälle, on sen korjaaminen kis-

konhionnalla mahdollista. Jos pienet säröt ulottuvat kulkureunaan asti, on kisko vaihdettava ehjään. [17, 49]



Kuva 25 Toistuvien ympärilyöntien tuottama jälki kiskossa.

5.1.2 Kulkupinnan lävistymä

UIC:n määrelehden 712 [49] mukaan kulkupinnan lävistymä on melko lyhyt, paikallinen painauma kiskon pinnassa, jonka kohdalta kulkupinta voi olla hieman levinnyt. Vika on seurausta valmistusvirheestä. Kiskojen päihin, jotka on liitetty toisiinsa sidekiskoatkoksien, voi jatkosraon ollessa auki kohdistua iskumaisia kuormituksia, jotka aiheuttavat kulkupinnan lävistymisen. Kulkupinnan lävistymä johtaa suurempiin dynaamisiin kuormiin. [14] Kuvassa 26 on esitetty kulkupinnan lävistymä.



Kuva 26 Kulkupinnan lävistymä.

5.1.3 Kuluneisuus

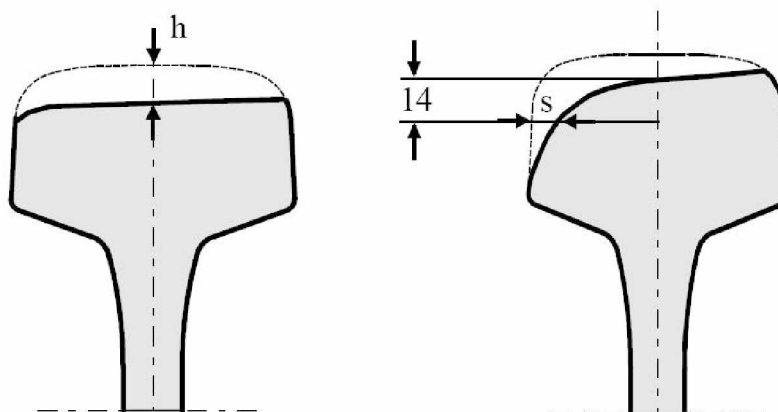
Kiskojen kuluneisuus jaetaan sivu- ja korkeuskuluneisuuteen. Sivukulumista tapahtuu etenkin kaarresäteeltään alle 800 m kaarteiden ulkokiskojen kulkureunassa, pääasiassa pyörien aiheuttamien suurten sivuttaisvoimien ja luiston johdosta. Kuvassa 27 on esitetty kaarteiden ulkokisko, jonka kulkureuna on kulunut voimakkaasti. Kulumista voi ilmetä myös kulkupinnassa niin suoralla kuin kaarteissakin normaalin pyöräkisko-vuorovaikutuksen seurauksena. Koska kiskon pinnassa olevat muut viat, kuten säröt ja ympärilyöntijäljet, voivat hävitä kulumisen myötä, on kiskoja mahdollista

kunnossapitää tuottamalla niihin keinotekoisista kulumista kiskonhionnalla (ks. luku 7.1). [44]



Kuva 27 Voimakasta sivukuluneisuutta kaarten ulkokiskossa.

Kiskojen kuluneisuuden katsotaan olevan vika, mikäli sivukuluneisuus on voimakasta tai kiskoprofiili muutoin muuttuu epäsopivaksi kulumisen myötä. Suomessa sivukuluneisuudelle sekä korkeus- ja sivukuluneisuuden pohjalta laskettavalle vertailukuluneisuudelle on määritetty raja-arvot, joista kerrotaan tarkemmin luvussa 8.2. Korkeuskuluneisuus mitataan hamaran keskilinjalta ja on hamaran pystysuora korkeuden muutos alkuperäiseen nähden. Sivukuluneisuus mitataan 14 mm hamaran keskilinjan yläpinnan alapuolelta ja on hamaran leveyden vaakasuora muutos. [48] Kuvassa 28 on esitetty kaavakuvat korkeus- ja sivukuluneuksien mittauskohdista.



Kuva 28 Kiskon korkeus- $[h]$ ja sivukuluneisuuden $[s]$ mittauskohda [48].

Kiskojen kulumisen voimakkuuteen vaikuttavat kisko-pyöräkontaktin normaalivoima, osittaisluisto sekä kitkakerroin [44] Kiskojen mekaaninen kulumisen voi tapahtua muun muassa adhesiivisena tai abrasiivisena kulumisena [15]. Adhesiivisessä kulumisessa kaksi toisiaan vasten liikkuvaa pintaa tarttuvat hetkellisesti toisiinsa. Kun pinnat irtoavat, toisesta tai molemmista pinnoista irtoaa materiaalia. Abrasiivisessa kulumisessa kovempi pinta kuluttaa pehmeämpää, johtaen tavallisesti pienten lastujen irtoamiseen. [51] Mekaanisen kulumisen lisäksi kiskot voivat altistua kemialliselle

kulumiselle, joka tarkoittaa käytännössä ruostumista [15]. Esimerkiksi tasoristeyksen kohdalla oleva kisko voi korrodoitua voimakkaasti, mikäli raiteen poikki kulkevaa tietä suolataan. Tällöin tielle levitetty suola voi ajautua kiskon pinnalle ja aiheuttaa kiskon korrodoitumisen. Tasoristeysten ohella kiskojen korroosiota voi ilmetä esimerkiksi syövyttävien aineiden kuormausraiteilla sekä rautatietunneleissa. [28]

5.1.4 Korrugaatio

Korrugaatio on kiskon kulkupinnassa esiintyvää suhteellisen jaksottaista aaltoisuutta (Kuva 29) [52]. UIC:n määrelehdessä 712 [49] se jaetaan aallonpituudeltaan lyhyeen ja pitkään korrugaatioon. Lyhytaaltoisen korrugaation aallonpituus on 30 – 80 mm ja pitkäaaltoisen 80 – 300 mm. Ratahallintokeskuksen julkaisemassa kiskonhionnan teknisissä toimitusehdoissa [53] kiskon pinnassa esiintyvä aaltoisuus jaetaan aallonpituuden mukaan kolmeen alueeseen: riilat (30 – 100 mm), lyhyet aallot (100 – 300 mm) ja pitkät aallot (300 – 1000 mm). Grassien [54] mukaan yli 1 m aallonpituisen aaltoisuus ei enää ole korrugaatiota, sillä sen syntymekanismi poikkeaa seuraavassa esitettävistä korrugaation syntymekanismeista. Zakharovin [46] mukaan pitkät, aallonpituudeltaan noin 1,5 m aallot syntyvät valmistuksessa kiskoon muodostuneen aaltoisuuden johdosta.



Kuva 29 Lievää korrugaatiota kiskossa.

Korrugaation aallonpituuden on aiemmin pidetty olevan kaluston nopeudesta riippumaton suure. Nykyisen käsityksen mukaan näin ei kuitenkaan ole, vaan korrugaation aallonpituus määräytyy värähtelevän systeemin ominaistajuuden ja kaluston nopeuden mukaan seuraavasti [54]:

$$L_{corr} = v/f_s \quad (5.1)$$

jossa L_{corr} on korrugaation aallonpituus, v on kaluston nopeus ja f_s on ominaistajuus.

Tapaa, jolla kalusto tai sen osa ja rata värähtelevät keskenään, kuvataan niin kutsutulla aallonpituuden määrävällä mekanismilla³ (wavelength fixing mechanism). Aallonpituuden määrävä mekanismi kertoo, mitkä kaluston ja radan komponentit vaikuttavat värähtelyyn. Värähtelyn ominaistajuus riippuu värähtelyn tyypistä ja keskenään

³ Aallonpituuden määrävän mekanismin nimitys lienee peruja ajalta, jolloin korrugaation ajateltiin olevan vakioaallonpituuksinen ilmiö. Nykyisin oikeampi termi kyseiselle mekanismille lienisi taajuuden määrävä mekanismi.

värähtelevien komponenttien ominaisuuksista. Värähtely aiheuttaa kiskon kulkupinnan pitkittäissuuntaisen tasaisuuden muuttumisen tietyllä vauriomekanismilla (damage mechanism). Erialaisten mahdollisten aallonpituuden määrävien mekanismien ja vauriomekanismien yhdistelmien pohjalta Grassie [52] jakaa korrugaatiovauriot kuuteen tyyppiin. Taulukossa 8 on esitetty viisi näistä tyypeistä. Kuudes korrugaatiotyyppi ("Trackform specific" -korrugaatio) on jätetty tämän tarkastelun ulkopuolelle.

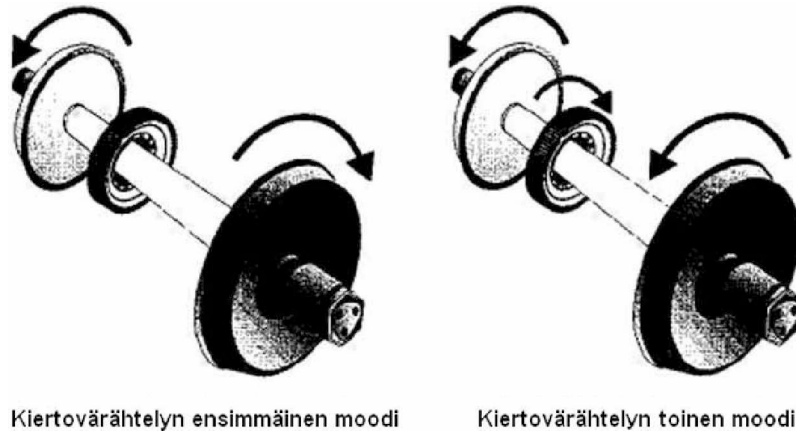
Taulukko 8 Eri korrugaatiotyypit, niiden aallonpituuden määrävät mekanismit ja vauriomekanismit [52].

Tyyppi	Aallonpituuden määrävä mekanismi	Vauriomekanismi
Heavy Haul	P2-resonanssi	Pinnan plastinen muodonmuutos
Light Rail	P2-resonanssi	Kiskon plastinen taipuminen
Yleinen P2	P2-resonanssi	Kuluminen
Rutting	Vetävien akselien kiertovärähtelyn toisen moodin resonanssi	Kuluminen
Pinned-Pinned	Pinned-pinned-resonanssi	Kuluminen

Heavy Haul-, Light Rail- ja muu P2-korrugaatio johtuvat kukin P2-resonanssista. P2-resonanssi on seurausta kiskossa olevan geometriavirheen, kuten geometrialtaan huonon hitsin aikaansaamasta dynaamisesta voimasta, joka saattaa kaluston ja radan värähtelemään. P2-resonanssin taajuus määräytyy radan jäykkyyden (stiffness) ja kaluston jousittamattoman massan mukaan.

Ero näiden kolmen korrugaatiotyypin välillä on vauriomekanismi, jolla värähtely vaurioittaa kiskoa. Heavy Haul -korrugaatiota ilmenee radoilla, joissa kiskot ovat jäykkiä (suuri metripaino) ja joilla ajetaan yli 15 tonnin akselipainoilla kohtuullisen matalilla ja tasaisilla nopeuksilla. Värähtelyn aiheuttama dynaaminen kuorma yhdistettynä korkeaan staattiseen kuormaan aiheuttaa materiaalin myötölujuuden ylittävän jännityksen, josta seuraa kiskon pinnan plastinen muokkautuminen. Light Rail -korrugaatiota esiintyy puolestaan radoilla, joissa kiskojen taivutusjäykkyys on alhainen (pieni metripaino). Alhaisen taivutusjäykkyyden johdosta kiskot taipuvat värähtelevän massan alla plastisesti. Yleisen P2-korrugaation vauriomekanismi on kuluminen. Sitä esiintyy Grassien [54] mukaan monilla erityyppisillä radoilla.

Toinen korrugaatiota aiheuttava aallonpituuden määrävä mekanismi on vetävien akselien kiertovärähtely, jonka ensimmäinen ja toinen moodi on kuvattu kuvassa 30. Ensimmäisessä moodissa akselissa olevat pyörät värähtelevät toisiaan vastaan. Toisessa moodissa pyörät värähtelevät samaan suuntaan akselin keskellä olevaa massaa, kuten vaihteistoa vastaan. Kiertovärähtelyn toisen moodin on havaittu olevan ensimmäistä yleisempi korrugaation aiheuttaja. Se on seurausta vetävien pyörien vuorottaisesta luistosta ja pidosta. Kun pyörät luistavat, kuluttavat ne kiskon pintaa luoden kiskoon aaltomaisen muodon. Tämän tyyppistä korrugaatiota kutsutaan "rutting"-korrugaatioksi. Sitä esiintyy pääasiassa kaarteiden sisäkiskoissa, mutta myös suorilla rataosuuksilla kohdissa, joissa junat vetävät tai jarruttavat voimakkaasti. [54]



Kuva 30 Vetävän akselin kiertovärähtelyn ensimmäinen ja toinen moodi [54].

Kolmas aallonpituuden määräävä mekanismi on niin sanottu ”pinned-pinned”-resonanssi, jossa kisko värähtelee ratapölkkyjen välillä, kiskonkiinnikkeiden toimies- sa solmukohtina. Kiskon värähtely johtaa pyörien jaksottaiseen luistamiseen, jonka seurauksena kiskon pinta kuluu aaltomaiseksi. Värähtelyn taajuus määräytyy pääasi- assa peräkkäisten ratapölkkyjen välisen matkan ja kiskon taivutusjäykkyyden perusteella. [54]

Kiskoon muodostunut korrugaatio aiheuttaa suuria dynaamisia kuormia ja lisäänty- nyttä melua. Dynaamiset kuormat voivat vaurioittaa niin radan komponentteja kuin liikkuvaa kalustoakin. [9] Korrugaatiota voidaan poistaa kiskonhionnan avulla. Kui- tenkin, koska korrugaation poistaminen on kallista, on kannattavampaa pyrkiä pois- tamaan tekijät, joista korrugaatio aiheutuu.

5.1.5 Pintaviat

Pintaviat jakaantuvat UIC:n määrelehden 712 [49] mukaan kolmeen alaryhmään: suomuilu, pitkät urat ja uurre. Suomuilussa kiskon pinnasta irtoaa ohuita metal- lisuomuja, josta voi muodostua kiskon pintaan muutaman millimetrin syvyinen pai- nauma. Pitkät urat ovat seurausta kiskon pinnasta irtoavasta metallinauhasta, joka voi olla jopa metrejä pitkä, mutta harvoin muutamaa millimetriä syvempi. Uurre on kaksi tai kolme millimetriä syvä, pitkittäissuuntainen ja lankamainen vaurio kiskon pinnassa, joka muodostuu pian kiskon asennuksen jälkeen, mutta yleisimmin häviää kiskon kulumisen myötä vähitellen.

UIC:n määrelehden 712 [49] mukaan pintaviat ovat valmistusvirheistä, kuten man- gaanisulfidisulkeumista, johtuvia vaurioita. Kulkupinnalla esiintyvät vauriot, jotka johtuvat ulkoisista tekijöistä, kuten pyörän alle joutuneesta kivistä tai lovipyörästä, nimetään pintaruhjeiksi.

5.1.6 Vierintäväsyminen

Vierintäväsymisellä⁴ tarkoitetaan yleisesti joukkoa vikoja, jotka ovat seurausta kaluston pyörien aiheuttamasta materiaalin toistuvasta ylikuormituksesta. Toistuva ylikuormitus johtaa materiaalin muokkautumiseen ja lopulta muokkautumiskyvyn ehtymiseen ja säröjen syntymiseen. Vierintäväsymissäröt voivat ydintyä joko kiskon pinnalle tai pinnan alle. [55]

Pinnalla tapahtuva vierintäväsyminen johtaa mikroskooppisten säröjen syntymiseen. Säröt ydintyvät kiskon pintaan noin 0,5 – 10 mm päähän toisistaan ja esiintyvät tavallisesti laajalla alueella [45]. Säröt kasvavat noin 10 – 30 asteen kulmassa pintaan nähden [44]. Muutaman millimetrin syvyyteen kasvaneet säröt voivat johtaa sälöilemiseen (spalling), jolloin kiskon pintakerroksesta murtuu paloja irti. Osa säröistä voi kääntyä myös poikittaisiksi, johtaen kiskon murtumaan. Kuvassa 31 on nähtävissä pintaan ydintyneitä vierintäväsymissäröjä sekä sälöilyä. Vierintäväsymissäröjen kasvunopeus kiihtyy säröjen pituuden mukana [56].



Kuva 31 Pintaan ydintyneitä vierintäväsymissäröjä ja sälöilyä kiskon hamarassa.

Pinnalle syntyvät vierintäväsymissäröt voivat muodostua kiskon kulkupinnalle tai lähelle kulkureunan pyöritystä. Kulkupinnalle muodostuvia säröjä ilmenee sekä ulko- että sisäkiskoissa [44]. Etenkin kohdissa, joissa raideleveys on tavallista suurempi ja radalla liikennöivän kaluston pyörät ovat kuluneita, voi kiskoon kohdistua niin sanottu valelaipan kontakti (ks. luku 7.1.1), joka kohdistaa kiskoon suuren pintapaineen ja siten nopeuttaa kiskon pinnan vikaantumista [56]. Kulkureunan pyöritykseen syntyvät vierintäväsymissäröt ilmenevät tavallisesti kaarteiden ulkokiskoissa [44]. Keski- ja sisäkaarresäteen, Kapoorin et al. [15] mukaan noin 1500 m, omaavat kaarteet ovat erityisen alttiita vierintäväsymiselle. Alttius on seurausta siitä, että tällä kaarresädealueella kalusto kohdistaa kiskoon sopivan suuruisen voiman. Tätä loivemmissa kaarteissa kiskoon ei kohdistu riittäviä vierintäväsymiseen tarvittavia voimia ja tiukem-

⁴ Vierintäväsymiseen liittyvä terminologia on englanninkielisessä kirjallisuudessa melko vaihtelevaa. Pääasiallisesti pintaan ydintyneitä vierintäväsymissäröjä kutsutaan head checkeiksi tai gauge corner crackingiksi, niiden ydintymiskohdan mukaan. Näiden lisäksi myös muita nimityksiä, kuten gauge corner checking tai running surface checking on käytössä. Spalling tarkoittaa yleisesti pintaan ydintyneiden vierintäväsymissäröjen aikaansaamaa sälöilemistä ja shelling pinnan alle ydintyneitä säröjä. Tosin esimerkiksi UIC:n määrelehdessä 712 shelling viittaa niin pinnalla kuin pinnan alla tapahtuvaan vierintäväsymiseen.

missa kaarteissa voima on niin suuri, että kisko kuluu, eikä vierintäväsyrmissäröjä pääse ydintymään. Kaarresädealue, joka on alttein vierintäväsyrmisselle, riippuu radan ja erityisesti sillä liikennöivän kaluston ominaisuuksista.

Pintaan ydintyneiden vierintäväsyrmissäröjen kasvu voi nopeutua huomattavasti, mikäli säröön joutuu nestettä, kuten vettä. Nopeutuminen on seurausta kahdesta seikasta. Ensinnäkin rakoon joutunut neste voitelee särön murtopinnat, jolloin ne voivat liikkua vapaammin vastakkain. Toiseksi säröön joutunut neste voi kuorman alaisena aiheuttaa särön sisälle huomattavan paineen ja toimia ikään kuin kiilana pakottaen säröä kasvamaan [55]. Veden lisäksi myös kiskojen voiteluun⁵ käytetty öljy voi säröön joutuessaan nopeuttaa sen kasvua. Veteen nähden voiteluöljyn viskositeetti on kuitenkin verrattain korkea, eikä se siten tunkeudu säröihin yhtä helposti kuin vesi. Kiskon kulkupinnalla käytettävät kitkansäätelyaineet (friction modifiers) ovat puolestaan usein vesipohjaisia ja voivat voiteluaineita herkemmin edistää vierintäväsyrmissäröjen kasvua.

UIC:n määrelehti 712 [49] erottelee pinnalle ydintyvät vierintäväsyrmissäröt kolmeen luokkaan sen mukaan, kuinka pitkälle ne ovat edenneet. Ensimmäiseen luokkaan kuuluvat säröt, jotka ilmenevät ainoastaan hienoina viivoina kiskon pinnassa. Toiseen luokkaan kuuluvat säröt, jotka ovat aiheuttaneet kiskon pinnan säliöilyä. Kolmanteen luokkaan kuuluvat säröt, joista on kasvanut poikittainen halkeama. Mikäli kiskossa on lukuisia vierintäväsyrmissäröjä, joista on kasvanut poikittainen halkeama, seuraa niistä huomattava junan suistumisriski, sillä murtuessaan kisko voi murtua lukuisiin osiin.

Pinnan alle muodostuvat vierintäväsyrmissäröt ydintyvät tavallisesti noin 2 – 8 mm syvyyteen kulkureunan pyöritykseen. Säröt kasvavat kulkureunan pyörityksen alla kiskon pituus suunnassa. Kasvettuaan tietyn matkaa, ne voivat kääntää kasvusuuntansa ylöspäin, jolloin kulkureunan pyörityksestä lohkeaa pala irti (shelling). Särön on myös mahdollista kääntää kasvusuuntansa poikittaiseksi, jolloin se johtaa kiskon poikittaiseen murtumaan. [44]

Koska vierintäväsyrmissäröt syntyvät voimakkaan leikkausjännityksen seurauksena, riippuu niiden ydintymiskohta suurimman leikkausjännityksen sijainnista kiskossa. Suurimman leikkausjännityksen sijainti riippuu vaakasuuntaisen ja normaalivoiman suhteesta. Jos vaakasuuntaisen ja normaalivoiman suhde on alle 0,2, sijaitsee suurin leikkausjännitys kiskon sisässä. Tällöin säröjen ydintyminen tapahtuu pinnan alla. Suurempi akselipaino kasvattaa normaalivoimaa, jonka seurauksena suhdeluku voi pienentyä ja siten säröt ydintyvät herkemmin pinnan alle. [42]

Pienemmillä akselipainoilla normaalivoima on pienempi ja etenkin suurnopeusjunien alla vaakasuuntaiset voimat voivat muodostua kaarteissa suuriksi niiden jäykän telirakenteen vuoksi. Tällöin voimien suhdeluku nousee korkeammaksi ja suurin leikkausjännitys siirtyy kiskon pinnalle. Tästä seuraa vierintäväsyrmissäröjen ydintyminen kiskon pinnalle. [42]

⁵ Tiukoissa kaarteissa, joissa liikkuva kalusto kuluttaa ulkokiskoa voimakkaasti, kulumista voidaan vähentää käyttämällä kiskonvoitelulaitteita. Radalla oleva kiskonvoitelulaite kohdistaa kiskon kulkureunaan pienen öljysuihkun, jonka ansiosta kitkakerroin pyörän laipan ja kiskon kulkureunan välillä laskee alhaiselle tasolle ja kulumisen vähenee.

Vierintäväsymisestä on tullut merkittävä ongelma viimeisten muutaman vuosikymmenen aikana monille maailmalla toimivista rautateistä. Syitä lisääntyneisiin vierintäväsymisestä johtuviin vikoihin ovat muun muassa kasvaneet akselipainot ja nopeudet, vähentynyt kiskon kuluminen kovempien teräslaatuojen myötä sekä suuret sivuttaisvoimat, joita suurnopeusjunat voivat aiheuttaa. [43]

Vierintäväsymissäröt ovat erityisen haitallisia kahdesta syystä. Ensinnäkin ne voivat johtaa kiskon murtumiin mikäli niitä ei havaita ja poisteta riittävän ajoissa. Toiseksi ne voivat estää allaan olevien syvempien ja vakavampien vikojen havaitsemisen perinteisellä ultraäänitarkastuksella. [44]

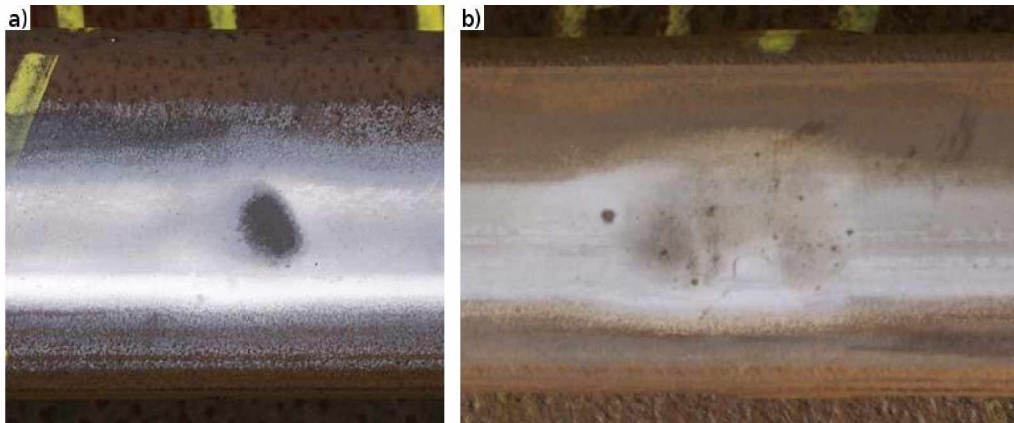
Vierintäväsymissäröjen syntymistä on mahdollista ehkäistä ennaltaehkäisevällä hionnalla. Tällä tavoin kiskoon tuotetaan vähäinen, mutta riittävä määrä keinotekoisia kulumista, jonka avulla ydintyvät vierintäväsymissäröt saadaan poistettua kiskosta. Myös kiskon pinnan alle ydintyviä vierintäväsymissäröjä on mahdollista ehkäistä ennaltaehkäisevällä hionnalla. Kun pinnasta poistetaan vähäinen määrä materiaalia, saadaan sekä muokkauslujittunutta kerrosta että liikenteen aiheuttamien voimien maksimia siirrettyä syvemmälle, uuteen kohtaan kiskossa.

5.1.7 Squat

Squat-vika on ulkonäöltään painauma kiskon pinnassa. Painauma on seurausta pinnan alle muodostuneista säröistä, jotka erottavat kiskon pintakerroksen muusta hamarasta. Tällöin massiivinen hamara ei enää tue pintakerrosta, vaan se pääsee leviämään ja madaltumaan liikenteen alla. Squat-viat ilmenevät tavallisesti jonkun muun kulkupinnan epäjatkuvuuskohdan, kuten korrugaation tai hitsien yhteydessä. [15]

Squat-vikoja on kahdentyyppisiä. Yhdentyypiset squat-viat ydintyvät kiskon kulkupinnalle muodostuneeseen hauraaseen kerrokseen. Toisentyypiset squat-viat ydintyvät kulkureunan pyöristykseen muodostuneisiin vierintäväsymissäröihin. [42] Kummankin tyyppisiä vikoja esiintyy tavallisesti suurisäteisissä kaarteissa sekä suorilla rataosuuksilla. Niitä esiintyy sekä yksittäisinä että useiden vaurioiden ryppäinä [57].

Kiskon kulkupinnalle ydintyvät squat-viat ovat yleisempiä. Alkuvaiheessaan ne näyttävät tummilta läikiltä kiskon pinnalla (Kuva 32). Ne koostuvat kahdesta eri suuntiin, noin 3 – 5 mm pinnan alla, pintaan nähden loivassa kulmassa kasvavasta säröstä. Raitteilla, joilla liikenne on yksisuuntaista, liikenteen suuntaan kasvavaa säröä kutsutaan johtosäröksi (leading crack). Vastakkaiseen suuntaan kasvavaa säröä kutsutaan takasäröksi (trailing crack). Johtosärö on tavallisesti monta kertaa takasäröä pidempi ja siitä haarautuu useita pienempiä säröjä. [57]



Kuva 32 Kiskon hamaran pinnassa a) varhaisessa vaiheessa oleva ja b) pidemmälle edennyt squat-vika [58].

Tutkimusten mukaan kiskon kulkupinnalle muodostuva squat-vika ydintyy kiskon pintaan syntyneeseen WEL-kerrokseen (white etching layer) [57] ja kasvaa siitä kiskon sisään kuormituksen seurauksena. WEL-kerros on kova ja hauras, noin 5 – 60 µm paksu kerros [57], joka Zhangin et al. [59] mukaan koostuu voimakkaasti muokkautuneesta perliittistä sekä nanokiteisistä martensiitista, austeniitista ja sementtiitistä. Kerroksen kovuus voi olla jopa 1200 HV [59]. WEL-kerros on saanut nimensä ulkonäkönsä mukaan, sillä mikroskoopilla tarkasteltuna se näyttää tasaisen valkoiselta, ilmeettömältä kerrokselta [60].

WEL-kerros syntyy vetävien pyörien osittaisluiston aiheuttaman kiskon pintakerroksen voimakkaan muokkautumisen seurauksena. Syntyprosessi on luonteeltaan adiabaattinen eli siihen ei liity lämpötilan kasvua. Erityisen voimakkaasti pintaa muokkaavat junat, joissa on luistonesto- ja jarrujen lukkiutumisen estäviä järjestelmiä, jotka mahdollistavat toimimisen pidon rajoilla. WEL-kerrosta esiintyy erityisesti radoilla, joilla ei tehdä kiskonhiontaa. [57]

Kulkureunan pyöritykseen muodostuneisiin vierintäväsymissäröihin ydintyvät squat-viat kasvavat vaakasuunnassa kohti kiskon hamaran keskilinjaa. Vian kasvettua riittävästi, se muistuttaa ulkoisesti edellä esitettyä hamaran pinnasta kasvavaa squat-vikaa. [42]

Isossa-Britanniassa squat-viat yleistyivät voimakkaasti 1970-luvulla, kun puisten ratapölkkyjen tilalle alettiin asentaa betoniratapölkkyjä. Kuitenkin vuoden 1974 jälkeen käyttöön otettujen jatkuvavalettujen kiskojen myötä squat-vikojen muodostuminen väheni merkittävästi. [15] Viitalan [61] mukaan squat-vikoja esiintyy Suomessa vain vähän ja havaitut viat ovat olleet pääasiassa vaihteiden tukikiskoissa. Suomen kiskovikatilastoissa ei ole raportoitu squat-vikoja.

5.1.8 Hamaran sisäiset viat

Hamaran sisäiset viat jaetaan poikittaisiin ja pitkittäisiin vikoihin. Kummankin tyyppiset viat kasvavat väsymisen seurauksena vähitellen ajan ja kuormituksen myötä.

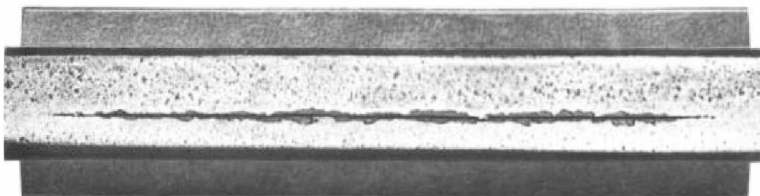
Poikittaiset väsymismurtumat (Kuva 33) ovat Yhdysvalloissa yleinen syy kiskon katkeamisiin [62]. Poikittainen väsymismurtuma voi ydintyä materiaalivirheeseen, kuten alumiinioksidisulkeumaan tai saada alkunsa esimerkiksi vierintäväsymissäröstä tai

ympäriyöntijäljestä. Murtuma kasvaa kiskon pituussuuntaan nähden poikittaisessa tasossa kiskoon kohdistuvien veto- ja taivutusvoimien alaisuudessa. Kun murtuma on kasvanut riittävän suureksi, johtaa se kiskon katkeamiseen. Murtuman koko, joka johtaa kiskon katkeamiseen, vaihtelee suuresti muun muassa murtuman sijainnin, kisko-
laadun, lämpötilan ja kuormituksen mukaan. Ulkoapäin poikittainen väsymismurtuma ei ole visuaalisesti havaittavissa ennen kuin se on edennyt pintaan saakka. [12]

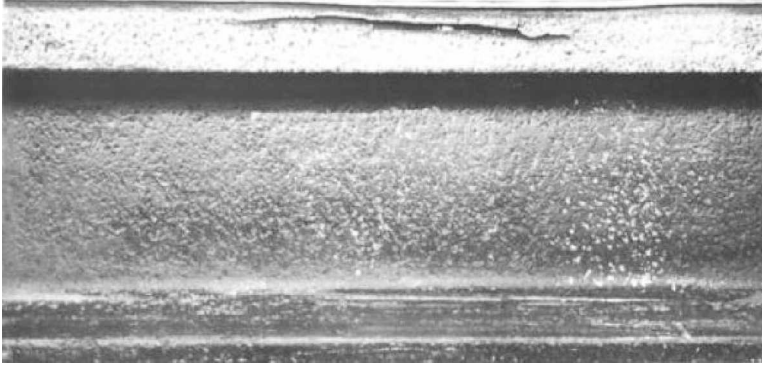


Kuva 33 Poikittainen väsymismurtuma [49].

Pitkittäiset viat jaetaan pysty- (Kuva 34) ja vaakahalkeamiin (Kuva 35). Materiaalipillisesti oikeampi nimitys useimmille halkeamiksi kutsutuille kiskovioille olisi murtuma. Kiskovikarekisterin perusteella halkeama-nimityksen käyttö on kuitenkin vakiintunutta, jonka vuoksi sitä tässäkin työssä käytetään. Halkeamat ovat yleensä seurausta kiskossa olevasta materiaalivirheestä, kuten voimakkaasta erkautumisesta tai sulkeumasta. Pitkälle edennyt pitkittäinen pystyhalkeama jakaa kiskon hamaran pystysuunnassa kahteen osaan. Pitkälle edennyt pitkittäinen vaakahalkeama jakaa hamaran puolestaan vaakasuunnassa kahteen osaan. Pitkittäinen vaakahalkeama voi myös kääntää kasvusuuntansa alaspäin, jolloin seurauksena kisko voi murtua myös poikittaisessa suunnassa. [12]



Kuva 34 Pitkittäinen pystyhalkeama [49].



Kuva 35 Pitkittäinen vaakahalkeama [49].

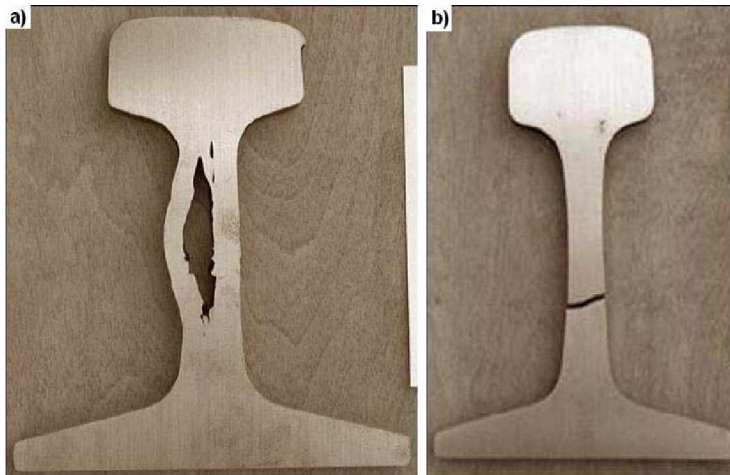
Mikäli kiskon kokemat jännitykset muuttuvat esimerkiksi kiskon asennon muuttumisen tai uudelleen asentamisen myötä huomattavasti, on se paljon alttiimpi pitkittäisille vioille. Kiskonhionnan myötä kiskon pinnasta voi paljastua sulkeumia, joista pitkittäiset viat kasvavat äkillisesti. [12]

5.2 Viat kiskon varressa

Kiskon varressa esiintyviä vikoja ovat pitkittäinen pystyhalkeama, vaakahalkeama ja säteishalkeama.

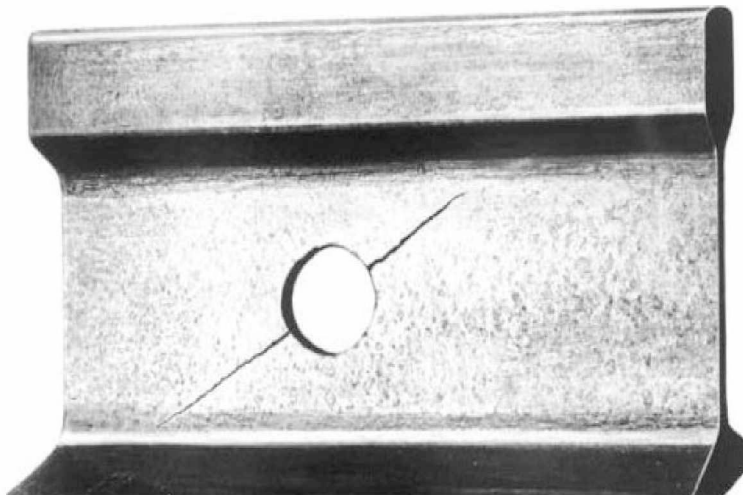
Pitkittäinen pystyhalkeama (Kuva 36a) on seurausta kiskon varteen valmistuksessa syntyneestä pystysuuntaisesta valmistusvirheestä, kuten imuontelosta tai saumasta. Valmistusvirhe ei tavallisesti kasva kuormituksen myötä, mutta voi raskaiden kuormien alaisena levitä sivusuunnassa johtaen varren pullistumiseen. Varren pitkittäisiä pystyhalkeamia ei juuri esiinny nykyaikaisilla tekniikoilla valmistetuissa kiskoissa. [12]

Vaakahalkeama varressa (Kuva 36b) voi esiintyä joko varren keskiosassa, hamaran ja varren välisessä pyörityksessä tai jalan ja varren välisessä pyörityksessä. Halkeama kasvaa aluksi vaakasuoraan, mutta voi kääntyä ylös- tai alaspäin johtaen kiskon murtumiseen. [12, 49] Varren keskiosaan muodostuva vaakahalkeama voi ydintyä valmistuksessa syntyneeseen saumaan tai valssausmerkintään.



Kuva 36 Laboratoriohieet kiskoista joissa on (a) levinnyt pitkittäinen pystyhalkeama varressa, (b) vaakahalkeama varressa [63].

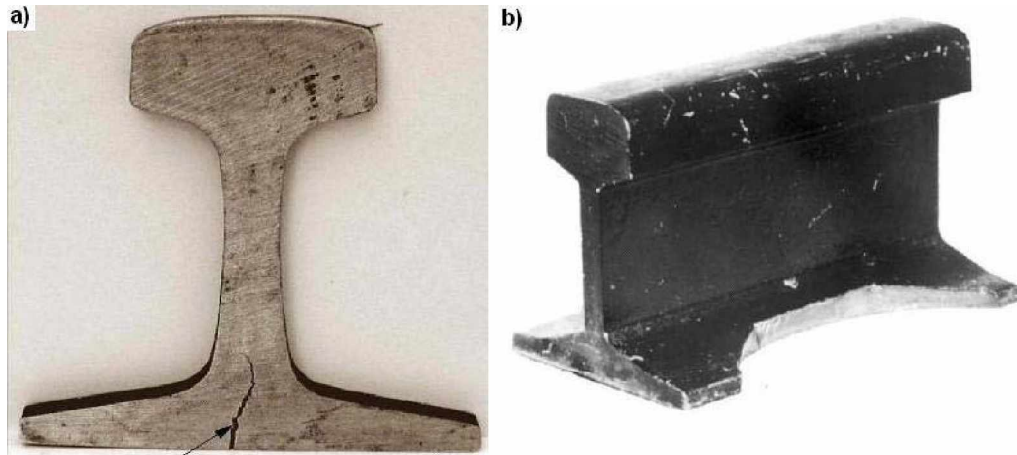
Varren säteishalkeamat ydintyvät yleisimmin sidekiskojen pulttien reikiin (Kuva 37), eivätkä siten muodosta varsinaista ongelmaa jatkuvaksi hitsatuilla radoilla. Pultinreikiin ydintyneet säröt kasvavat lähes poikkeuksetta vaakatasoon nähden 45 asteen kulmaan ja riittävän pitkiksi kasvettuaan johtavat kiskon katkeamiseen [49].



Kuva 37 Säteittäinen halkeama pultinreistä [49].

5.3 Viat kiskon jalassa

Kiskon jalkaan voi muodostua pitkittäisiä pystyhalkeamia (Kuva 38a). Ne voivat ydintyä liikennekuormituksen myötä kiskon jalan alapinnalla oleviin viivamaisiin valssauksessa syntyneisiin virheisiin. Halkeamista voi etenkin kylmällä ilmalla seurata kiskon katkeaminen. Mikäli halkeamia on ydintynyt useaan kohtaan samassa kiskossa, voi niiden murtuessa kiskoon muodostua huomattavan pitkä rako. [49] Pitkittäisten pystyhalkeamien on mahdollista ydintyä myös varren sivuun. Tällöin ne tavallisesti kääntyvät jonkin matkaa varren suuntaisesti kasvettuaan pois päin varresta, johtaen palan irtoamiseen jalasta (Kuva 38b). [12]



Kuva 38 a) Laboratoriohie kiskosta, jonka jalassa on pitkittäinen pystyhalkeama [63]. b) Kisko, jonka jalasta on murtunut irti pala [49].

Jalan ulkoreunasta voi kasvaa poikittainen halkeama, joka tavallisesti ydintyy iskun aiheuttamaan loveen. Poikittainen halkeama kasvaa hiusmurtumana tavallisesti korkeintaan neljä senttimetriä, jonka jälkeen se johtaa äkillisesti koko kiskon katkeamiseen. [12]

5.4 Viat hitseissä

Kiskoissa olevien kahdentyyppisten hitsien, jatkos- ja päällehitsien vuoksi viat hitseissä jaetaan näiden mukaisesti kahteen ryhmään: vikoihin jatkohitseissä ja vikoihin päällehitseissä.

5.4.1 Viat jatkohitseissä

Suomessa tehdään nykyisin pääasiassa termiitti- ja leimujatkohitsejä. Etenkin radan varrella tehtäviin hitseihin voi helposti valmistuksessa muodostua hitsin väsymiskeskeytyttä heikentäviä jännityskeskittymiä. Termiittihitseissä tällaisia ovat muun muassa kuonasulkeumat, kylmäjuoksut, imuontelot ja huokokset. Leimuhitseissä puolestaan esimerkiksi huolimattomasti poistettu purse, liitosvirhe tai oksidisulkeuma voi johtaa särön ydintymiseen. Hitseihin ydintyneet säröt voivat kasvaa liikennekuormituksen myötä ja johtaa kiskon murtumiseen. Kuvassa 39 on esitetty murtunut termiittihitsi.

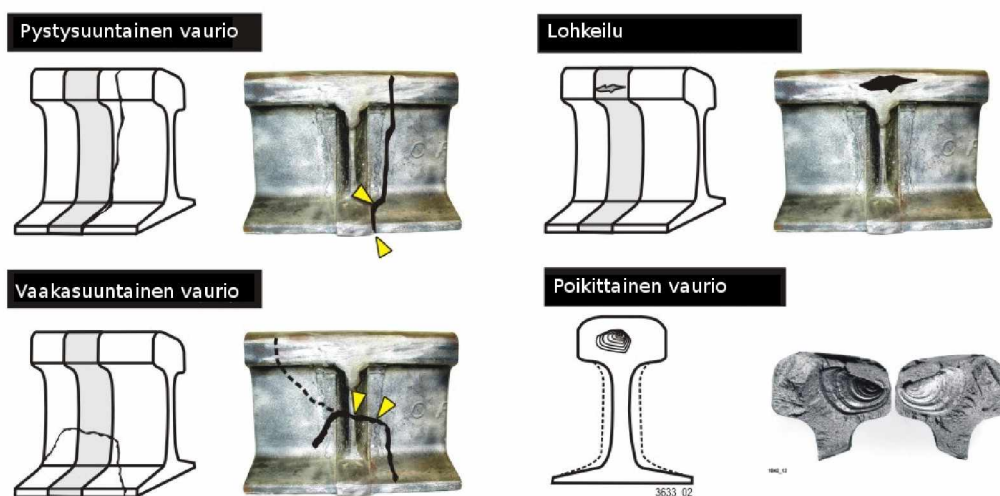


Kuva 39 Murtunut termiittihitsi.

Jatkoshitsit voivat murtua hyvin monella tavalla. Gutscherin [64] mukaan useimmissa termiittihitsien murtumissa on kuitenkin havaittavissa yhtäläisyyksiä, joiden pohjalta vauriotyypeille on mahdollista määrittää seuraavanlaiset pääluokat:

1. Pystysuuntainen vaurio
2. Vaakasuuntainen vaurio
3. Poikittainen vaurio
4. Lohkeilu
5. Kahden tai useamman edellä esitetyn vauriotyyppin yhdistelmä
6. Muu vika, joka ei vastaa edellä esitettyjä tyyppejä

Kuvassa 40 on esitetty vauriotyypit 1-4.



Kuva 40 Termiittihitseissä esiintyvät päävauriotyypit. Pystysuuntaiseen ja vaakasuuntaiseen vaurioon piirretyt nuolet kuvaavat kyseisen tyyppisten vaurioiden tavallisimpia ydintymiskohtia [64].

Pystysuuntainen särö ydintyy tavallisesti sularajalle tai sen välittömään läheisyyteen kiskon jalkaan tai jalan ja varren väliseen pyöristykseen. Se kasvaa väsymisen myötä poikittaisessa suunnassa, kunnes jäljellä oleva materiaali ei enää kestä kuormitusta ja hitsi murtuu. Pystysuuntainen särö on tavallisesti seurausta huokoisuudesta sularajan läheisyydessä tai muotin huonon asettelun johdosta muodostuneesta kylmäjuoksesta, joka toimii jännityskeskittymänä. [64]

Vaakasuuntainen särö ydintyy tavallisesti hitsissä kiskon varteen, josta se etenee väsymisen myötä vaakasuunnassa hitsin läpi. Särö voi edetessään kääntää kasvusuuntansa ylös- tai alaspäin tai haarautua molempiin suuntiin, johtaen kiskon murtumiseen. Vaakasuuntaiset säröt ydintyvät tavallisesti sulkeumiin, huokosiin tai pinnan epäjatkuvuuskohtiin, kuten hiontajälkiin tai valssausmerkintöihin. [64] Tämän vuoksi jatkoehitsien tekemistä valssausmerkintöjen läheisyyteen on vältettävä.

Termiittihitsiin voi syntyä huokosia, mikäli muottia on ylikuumennettu esilämmityksessä. Ylikuumennettaessa osa hiekkamuotin pinnasta lasittuu ja siten menettää kaasunläpäisevyytensä. Tällöin huokokset sijaitsevat tavallisesti nauhamaisena muodostelmana hitsin pinnalla. Huokosia voi muodostua myös, mikäli muottia ei ole esilämmitetty riittävästi. Tällöin muottiin voi jäädä kosteutta, joka hitsausreaktion kuumuudessa jää kaasuhuokosina hitsin sisään. Mikäli kiskonpää on puhdistettu huonosti, voi niissä olla ruostetta ja valssaushilsettä. Ne sisältävät runsaasti kosteutta, eikä niitä ole mahdollista täysin kuivattaa esilämmityksellä. Täten oksidit ja valssaushilse johtavat niin ikään huokoisuuteen. [65]

Termiittihitsiin voi joutua kuonasulkeumia, mikäli termiitti valetaan liian aikaisessa vaiheessa. Tällöin termiittireaktio ei ole ehtinyt tapahtua loppuun saakka, eikä kuonalla ja sulalla teräksellä ole ollut riittävästi aikaa erottua. Hitsiin voi joutua myös hiekkasulkeumia, mikäli muotista murtunut pala joutuu hitsirakoon. [65]

Riittämätön esilämmitys voi huokosten lisäksi johtaa myös liitosvirheeseen tai lämpöshokin aiheuttamiin säröihin. Liitosvirhe tarkoittaa hitsiaineen ja hitsattavan kappaleen välistä epätäydellistä liittymistä. Lämpöshokin lisäksi myös liian suuri jäähtymisnopeus voi aiheuttaa säröjen ydintymisen hitsiin [12].

Gutscherin [65] mukaan myös leimuhitsien murtumisissa on nähtävissä edellä termiittihitseille esitettyjen vaurioiden pääluokkien mukaisia vikoja. Koska leimuhitsaus on lisäaineeton hitsausmenetelmä, ei leimuhitseissä esiinny kuonasulkeumia. Virheellisillä parametreilla tehty leimuhitsaus voi kuitenkin johtaa muun muassa liitosvirheeseen tai oksidisulkeumiin hitsissä. Virheellisesti tehty purseenpoisto voi jättää kiskon pinnalle terävän kielekkeen, joka toimii jännityskeskittymänä ja aiheuttaa särön ydintymisen.

5.4.2 Viat päällehitseissä

Päällehitsit ovat hamarassa olevien vikojen poistamiseksi tehtyjä kaarihitsejä. Korjaushitsauksesta kerrotaan tarkemmin luvussa 7.2. UIC:n määrelehdessä 712 [49] määritellään kahdentyyppisiä päällehitsauksesta johtuvia vikoja: Kaaripäällehitsin aiheuttama kiskon hamaran poikittainen pystyhalkeama sekä kaaripäällehitsin irtoaminen tai lohkeilu.

Kaaripäällehitsistä voi kasvaa kiskon hamaraan poikittainen pystyhalkeama, joka tavallisesti saa alkunsa hitsin juuresta olevasta sulkeumasta, paikallisesta hitsin epä-

jatkuvuuskohdasta tai kutistumissäröistä. Kasvettuaan riittävän suureksi halkeama johtaa kiskon katkeamiseen. [49]

Kaaripäällehitsi voi irrota tai lohkeilla irti perusmateriaalista hitsin ja perusmateriaalin rajapintaan muodostuvien vaakasuuntaisten säröjen myötä. Säröt voivat ydintyä hitsausvirheisiin, kuten huokosiin, sulkeumiin tai kutistumissäröihin. [49] Kuvassa 41 on esitetty lohkeillut kaaripäällehitsi.



Kuva 41 Lohkeillut kaaripäällehitsi.

5.5 Kiskojen vikaantuminen Suomessa

Suomessa kiskojen vikaantumista seurataan ultraäänitarkastusten (ks. luku 6.1.3) avulla. Ultraäänitarkastuksissa havaitut viat merkitään tarkastuspöytäkirjaan, joista kootaan vikatietokanta. Vikatietokantoja on koottu vuodesta 2006 alkaen. Seuraavassa esitetään vuosilta 2006 – 2008 olevien vikatietokantojen analysoinnin pohjalta tuloksia Suomessa esiintyvien erilaisten vikojen yleisyydestä.

Vikatietokantaan sisältyy tiettyjä epävarmuustekijöitä. Ensinnäkin yksittäinen vika voi ulkonäöltään muistuttaa toisen vikatyypin vikaa, jonka vuoksi se luokitellaan väärin. Toiseksi, eri tarkastajat voivat luokitella saman vian eri vikatyypeiksi. Kolmanneksi, mikäli samalla kohtaa kiskossa esiintyy useampia vikoja, voi niiden erottaminen olla vaikeaa.

Eri valmistajien kiskojen todellisista määristä ei ole tietoa, mutta kiskovikatilastoissa Imatran ja Azoustaljin kiskot nousevat erityisesti esille. Kaikista ilmoitetuista vioista 40,5 % on Imatran ja 25,3 % Azoustaljin valmistamissa kiskoissa.

Taulukossa 9 on esitetty kiskovikatietokannan pohjalta lasketut vikojen prosentiosuudet vuosilta 2006 – 2008.

Taulukko 9 Vuosien 2006 – 2008 kiskovikatielokantojen pohjalta lasketut vikojen suhteelliset prosenttiosuudet.

Viat vuosina 2006 – 2008	UIC vikakoodit	Osuus ilmoitetuista vioista
Ympäriylöntijäljet	2251, 2252	29,7 %
Kulkupinnan läitistymät	124, 224	20,7 %
Sälöily	122, 222, 2221, 2222	9,6 %
Kaaripäällehitsin viat	471, 472	6,6 %
Pitkittäinen pystyhalkeama	113, 213	5,8 %
Pintaviat	121, 221	5,7 %
Vaakahalkeama	112, 212	4,9 %
Kaarijatkoshitsin viat	431, 432	4,4 %
Termitijatkoshitsin viat	421, 422	3,5 %
Leimuhitsin viat	411, 412	2,6 %
Muut viat	(23 kpl)	6,4 %

Noin 30 % ilmoitetuista vioista oli yksittäisiä tai toistuvia ympäriylöntijälkiä (UIC vikakoodit 2251 ja 2252) ja noin 20 % oli kulkupinnan läitistymiä (UIC vikakoodit 124 ja 224). Yksikään näistä vioista ei kuulunut vikaluokkaan 1, eikä siten vaatinut välitömiä toimenpiteitä. Ympäriylönneistä ainoastaan 2 % ja kulkupinnan läitistymistä 6 % kuuluivat luokkaan 2/1, ja ne oli korjattava siten ennen seuraavan talven tuloa. Kummankin vian vikaluokkiin 2 ja 3 kuuluvien havaintojen määrässä on nähtävissä kasvava trendi, joka on todennäköisesti seurausta jo edellisvuosina havaittujen vikojen uudelleen havaitsemisesta. Suurin osa kulkupinnan läitistymistä ilmeni Imatran ja Azoustaljin, ennen vuotta 1989 valmistetuissa kiskoissa.

Noin 10 % ilmoitetuista vioista olivat kiskon pinnan sälöilyä. Ilmoitusten mukaan 87 % sälöilyistä ilmeni kulkupinnalla (UIC vikakoodi 2221) ja 5 % kulkureunan pyöristyksessä (UIC vikakoodi 2222). Pintaan ydintyviä vierintäväsymissäröjä tai niistä johtuvaa sälöilyä (UIC vikakoodi 2223) ei vikatielokannoissa ilmennyt. On kuitenkin mahdollista, että osa vikakoodeille 2221 tai 2222 merkityistä vioista lukeutuu todellisuudessa vikakoodin 2223 alle. Sälöilyä ilmenee lähes yksinomaan ennen vuotta 1989 valmistetuissa kiskoissa. Sälöilleistä kiskoista huomattava osa on kevyitä K30 ja K43-profiilien kiskoja.

Ilmoitetuista vioista pintavikoja (UIC vikakoodit 121 ja 221) on noin 6 %. Pintaviat ovat UIC:n määrelehden 712 [49] mukaan seurausta valmistusvirheistä, mutta on mahdollista, että tämän vikaluokan alle on merkitty myös radalla havaittuja vierintäväsymissäröjä ja sälöilyä, jotka voivat muistuttaa suomuilua.

Ilmoitetuista vioista vaakahalkeamia (UIC vikakoodit 112 ja 212) sekä pitkittäisiä pystyhalkeamia (UIC vikakoodit 113 ja 213) on kumpiakin noin 5 %. Vaakahalkeamista noin 75 % on ilmennyt K30 tai K43 profiilin kiskoissa. Pitkittäisistä pystyhalkeamista puolestaan noin 90 % on ilmennyt 54 E 1 tai 60 E 1 profiilin kiskoissa. 54 E 1 ja 60 E 1 profiilien kiskoista, joissa on havaittu pitkittäinen pystyhalkeama, 80 % on ollut Imatran valmistamia.

Kaikista vioista noin 17 % on ilmennyt hitseissä. Eniten vikoja on ilmennyt kaaripäällehitsauksissa. Ilmoitetuista vioista 4,8 % on ollut kaaripäällehitsin irtoamista ja 1,8 % kaaripäällehitsistä alkanutta hamaran poikittaista halkeilua. Jatkoshitseistä eniten vikoja on ilmoitettu olevan kaarijatkoshitseissä, joissa on ollut 4,4 % ilmoitetuista vioista. Ilmoitetuista vioista 3,5 % on ollut termittijatkoshitseissä ja 2,6 % leimujat-

koshitseissä. Hitsien todellisia määriä ei ole tiedossa, joten vikojen esiintymistiheyksistä erityyppisissä hitseissä ei voida päätellä mitään.

Kiskovikatilastoissa ei esiinny merkintöjä squat-vioista (UIC vikakoodi 227). UIC:n määrelehden 712 [49] mukaan ympärilyöntijäljet ja kulkupinnan sälöily voivat kuitenkin ulkonäöllisesti muistuttaa squat-vikoja. Täten on mahdollista, että Suomen radoilla ilmenee squat-vikoja, mutta uudentyypisenä vikana niitä ei ole tunnistettu, vaan ne on luokiteltu muiksi vioiksi, kuten ympärilyöntijäljiksi.

6 Kiskon tarkastus

Kiskojen tarkastuksella tarkoitetaan niiden kunnan seuraamista ja mahdollisten vikojen havainnointia. Tarkastuksen avulla pyritään havaitsemaan kiskoon syntyvät viat ennen kuin ne aiheuttavat haittaa liikenteelle. Kiskojen tarkastustuloksia hyödyntämällä kunnossapito voidaan tehdä ennalta suunnitellusti ilman, että siitä koituu suurempaa haittaa liikenteelle.

Tässä luvussa kerrotaan ensin kiskojen eri tarkastusmenetelmistä. Tämän jälkeen luodaan katsaus siihen, kuinka usein tarkastuksia tulisi tehdä. Luvun lopuksi tutustutaan tarkastusmenetelmiin ja käytäntöihin Suomessa.

6.1 Menetelmät

Kiskojen kunnan tarkastukseen käytetään niin kutsuttuja ainetta rikkomattomia eli NDT-menetelmiä (non-destructive testing). Nimensä mukaisesti niiden käyttäminen ei edellytä tarkastettavan kohteen vaurioittamista. Yksinkertaisimmillaan ainetta rikkomaton testaus on tarkastettavan kappaleen visuaalista eli silmämääräistä tarkastelua. Näin on myös kiskojen tarkastuksen tapauksessa. Radalle tehtävän kävelytarkastuksen yhteydessä tarkastajan tulee havainnoida mahdollisia näkyviä vikoja, kuluneisuutta sekä muodonmuutoksia kiskoissa ja jatkoshitsien kuntoa [48].

Koska visuaalinen tarkastus rajoittuu ihmissilmän kykyyn havaita vikoja, on havainnointia helpottamaan kehitetty erinäisiä apukeinoja, kuten tunkeumaneste- ja magneettijauhetaarkastus. Näiden menetelmien avulla pienet viat on mahdollista saada helpommin havaittaviksi. Koska tavallinen radan kävelytarkastus on lähinnä yleiskatselmuksen radan kunnosta, näitä menetelmiä ei sen yhteydessä yleensä käytetä. Mikäli kiskon pinnan kunnosta halutaan saada tarkempaa tietoa, esimerkiksi hiontaa suunnitellussa, on kyseisten apukeinojen käyttö mahdollista.

Kuten edellisessä luvussa on esitetty, kaikkia vikoja ei ole mahdollista havaita silmämääräisesti päältäpäin. Täten sisäisten vikojen havaitsemiseksi on kehitetty erilaisia tarkastusmenetelmiä, joista merkittävimmissä asemassa on nykyisin ultraäänitarkastus. Ultraäänitarkastuksen lisäksi tässä luvussa käydään läpi pyörrevirta- ja induktiotarkastusten periaatteet.

Varsinaisten tarkastajien lisäksi myös muut henkilöt, kuten veturinkuljettajat, voivat havaita kiskojen vaurioita. Lisäksi raiteilla, joilla turvalaitteiden toiminta perustuu raidevirtapiiriin, kiskon kokonaan katkaiseva murtuma voidaan havaita turvalaitteen avulla. Turvalaite reagoi, kun sähkön kulku katkeaa raidevirtapiirissä.

6.1.1 Tunkeumanestetarkastus

Tunkeumanestetarkastus on nykyisin yksi käytetyimmistä ainetta rikkomattomista tarkastusmenetelmistä. Sen avulla on mahdollista paikantaa pintaan asti avoimia säröjä ei-huokoisilla pinnoilla. Tunkeumanestetarkastus on erittäin monikäyttöinen, sillä sen toimivuus ei edellytä tarkastettavalta materiaalilta erityisiä magneettisia tai sähköisiä ominaisuuksia. [66]

Tunkeumanestetarkastus tehdään seuraavanlaisesti [67, 68]:

1. Tarkastettavan kappaleen pinta puhdistetaan huolellisesti, jotta lika, öljy, vesi ja muut ei-toivotut aineet saadaan poistetuksi kappaleen pinnalta. Mikäli pinnalle jää jotain ei-toivottua ainetta, voi se estää tunkeumanesteen pääsyn säröön.
2. Kappaleen pinnalle levitetään tunkeumaneste joko pensselillä, ruiskuttamalla tai upottamalla kappale tunkeumanesteeseen. Tunkeumaneste on joko värillistä tai fluoresoivaa nestettä.
3. Tunkeumanesteen annetaan tunkeutua säröihin. Neste tunkeutuu säröihin kapillaarivoiman avulla. Käytetystä tunkeumanesteestä, tarkastettavasta kappaleesta sekä lämpötilasta riippuen tämä kestää 5 – 60 minuuttia.
4. Ylimääräinen tunkeumaneste pestään pois kappaleen pinnalta. Pesu on tehtävä tarkasti, jotta liika neste saadaan poistetuksi kuitenkin säröihin tunkeutunutta nestettä poistamatta.
5. Kappaleen pinnalle levitetään kehite, joka imee tunkeumanesteen säröistä itseensä. Kehite on useimmiten valkeaa jauhetta tai nestettä, josta värillinen tunkeumaneste erottuu helposti.
6. Kappale tarkastetaan silmämääräisesti sopivassa valossa. Normaaleja, värillisiä tunkeumanesteitä käytettäessä tarkastukseen sopii tavallinen, hyvä valaistus. Mikäli käytetty tunkeumaneste on fluoresoivaa, on tarkastus tehtävä pimeässä UV-valon avulla, jonka alla fluoresoiva neste hohtaa. Kehitteeseen muodostuneen tunkeumanesteen jäljen perusteella voidaan tehdä päätelmiä särön koosta, muodosta ja sijainnista. Tarkasti virheen kokoa ja etenkin leveyttä tunkeumanestejäljestä ei kuitenkaan voi määrittää.

Tunkeumanestetarkastuksella voidaan hyvässä valossa havaita särö, jonka leveys on 0,2 μm , mikäli se on vähintään 1 mm pitkä ja 10 μm syvä. Ilman tunkeumanestettä pienimmän silmämääräisesti havaittavan särön leveys on noin 50 μm . [68] Kuvassa 42 on esitetty kiskon hamara, joka on tarkastettu tunkeumanesteen avulla.



Kuva 42 Kiskon hamara, joka on tarkastettu tunkeumanesteen avulla [69].

Tunkeumanestetarkastuksen etuja ovat:

- Menetelmä on helppokäyttöinen; sen käyttäminen ei vaadi erityistä ammattitaitoa.
- Tarkastukseen tarvittavat aineet ovat saatavissa esimerkiksi spray-pulloissa. Ne ovat siten helposti kuljetettavia, jonka ansiosta tarkastus on mahdollista tehdä radan varrella.
- Tarkastuksen tulokset voidaan dokumentoida valokuvaamalla.
- Tunkeumaneste tuottaa säröä kuvaavan jäljen, jonka ansiosta tarkastustulosten tulkinta on kohtuullisen vaivatonta.

Tunkeumanestetarkastuksen heikkouksia ovat:

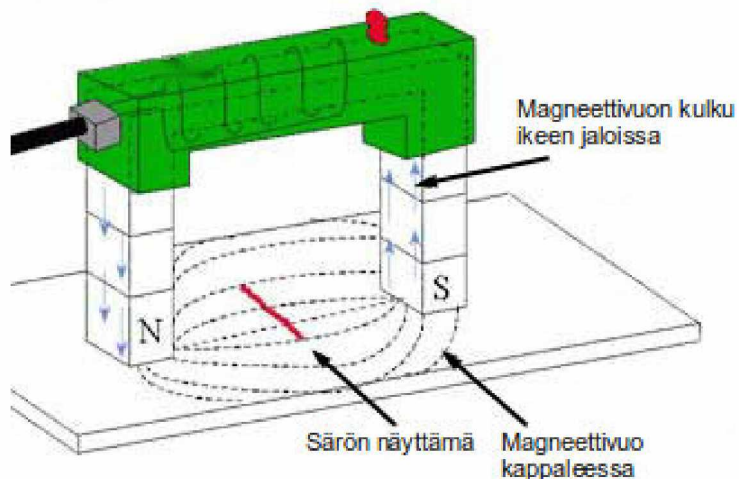
- Ainoastaan pintaan asti avoimia säröjä on mahdollista havaita.
- Menetelmä on melko hidas.
- Hiotuilta pinnoilta säröjen havaitseminen on epäluotettavaa, sillä hionnassa plastisesti muokkautunut materiaali voi peittää säröt.
- Pinnanlaatu voi vaikuttaa tarkastuksen herkkyyteen.

6.1.2 Magneettijauhetarkastus

Magneettijauhetarkastuksella voidaan tarkastaa ferromagneettisesta materiaalista, kuten perliittisestä teräksestä, valmistettuja kappaleita niiden pinnalla tai pinnan välittömässä läheisyydessä olevien epäjatkuvuuskohtien, kuten säröjen, havaitsemiseksi. Tarkastuksessa kappale magnetoidaan joko sähkö- tai kestopagneetin avulla. Mikäli kappaleessa kulkevien magneettisten voimaviivojen tielle osuu särö tai vastaava epäjatkuvuuskohta, aiheuttaa se kohdalleen magneettisen vuotokentän. Tällainen vuotokenttä kerää ympärilleen tarkastuksessa käytettäviä rautapartikkeleita, josta voidaan silmämääräisesti havaita epäjatkuvuuskohtien olemassaolo [68].

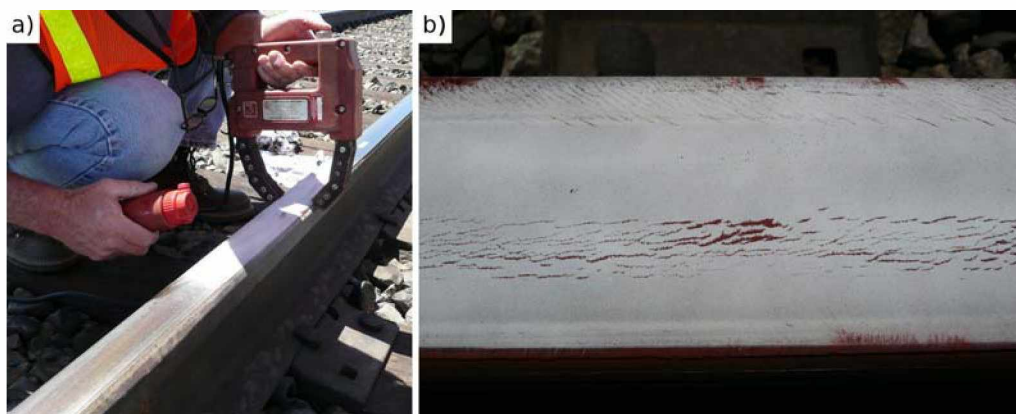
Jotta särö voidaan erottaa luotettavasti, on sen oltava 45 – 90 asteen kulmassa magneettikentän voimaviivoihin nähden. Pienemmässä kulmassa oleva särö ei aiheuta

riittävän suuruista vuotokenttää, eikä siten tule havaituksi. Tämän johdosta, kaikkien epäjatkuvuuskohtien havaitsemiseksi, magnetointi on aina tehtävä kahdessa toisiaan vastaan kohtisuorassa suunnassa. [67] Kuvassa 43 on kuvattu kappaleen magnetoiminen ikeellä ja magneettivuon kulku kappaleessa.



Kuva 43 Kappaleen magnetoiminen ikeellä ja magneettivuon kulku kappaleessa [67].

Tarkastuksessa käytettävät rautapartikkelit voivat olla kuivana jauheena tai suspensiona nesteessä. Tarkastusaineet ovat värillisiä tai fluoresoivia epäjatkuvuuskohtien helpon havaittavuuden takaamiseksi. [67] Kappaleen magnetointiin on käytettävissä laaja valikoimia erilaisia välineitä, mutta yleisimmin ulkona tapahtuvaan, kuten kiskojen tarkastukseen käytetty väline on akkukäyttöinen, hevosenkengänmallinen sähkömagneetti, i.e. Kuvassa 44a on esitetty magneettijauhetaarkastus iestä käyttäen ja kuvassa 44b säröjen näyttämät kiskon pinnalla.



Kuva 44 a) Magneettijauhetaarkastus ja b) sen näyttämät kiskon pinnalla. Kontrastin parantamiseksi kiskon pinnalle on sumutettu valkoista tunkeumanestetarkastukseen tarkoitettua kehitintä.

Magneettijauhetaarkastuksella voidaan havaita samaa kokoluokkaa olevia säröjä kuin tunkeumanesteelläkin. Normaaliolosuhteissa on mahdollista havaita luotettavasti noin 1 μm levyinen ja 25 μm syvyinen halkeama. Koska magneettijauhetaarkastuksen havaittavuus perustuu siihen, että kapea särö aiheuttaa itseään leveämmän magneet-

tisen vuotokentän, ei särön leveyttä ole mahdollista luotettavasti arvioida. Särön pituus on sen sijaan kohtuullisen tarkasti määritettävissä. [68]

Magneettijauhetautarkastuksen etuja ovat [66]:

- Menetelmä on nopea, sillä aineiden ei tarvitse antaa imeytyä tai kehittyä, vaan tulokset on nähtävissä lähes välittömästi.
- Kappaleen pinnan puhtaus on vähemmän kriittinen kuin tunkeumanestetautarkastuksessa.
- Magneettiaineen tuottama jälki vastaa melko hyvin epäjatkuvuuskohdan muotoa.
- Tarkastuksen tulokset voidaan dokumentoida valokuvaamalla.

Menetelmän heikkouksia ovat [66]:

- Kappale voidaan joutua demagnetoimaan tarkastuksen jälkeen mahdollisen jäännösmagnetismin poistamiseksi.
- Tarkastus on tehtävä vähintään kahteen suuntaan erisuuntaisten säröjen havaitsemiseksi.

6.1.3 Ultraäänitarkastus

Ultraäänitarkastus on nykyisin yleisimmin käytetty tarkastusmenetelmä kiskojen sisäisten vikojen havaitsemiseksi. Ultraäänitarkastusta tehdään erityisesti turvallisuussyistä, jotta myös sellaiset viat joita ei päältäpäin voida nähdä tulisivat havaituiksi. Nykyisin ultraäänitarkastuksella on mahdollista havaita hyvin varhaisessa vaiheessa olevia vikoja. Tämän ansiosta huoltotoimenpiteet on mahdollista suunnitella hyvissä ajoin etukäteen ja yllättävilä liikenteen keskeytyksiltä vältytään. [17]

Tässä luvussa kerrotaan aluksi ultraäänitarkastuksen teoriaa ja sitä, miten eri tarkastusparametrit vaikuttavat epäjatkuvuuskohtien havaittavuuteen. Näiden jälkeen kuvataan kiskojen tarkastukseen käytettäviä tarkastuslaitteita.

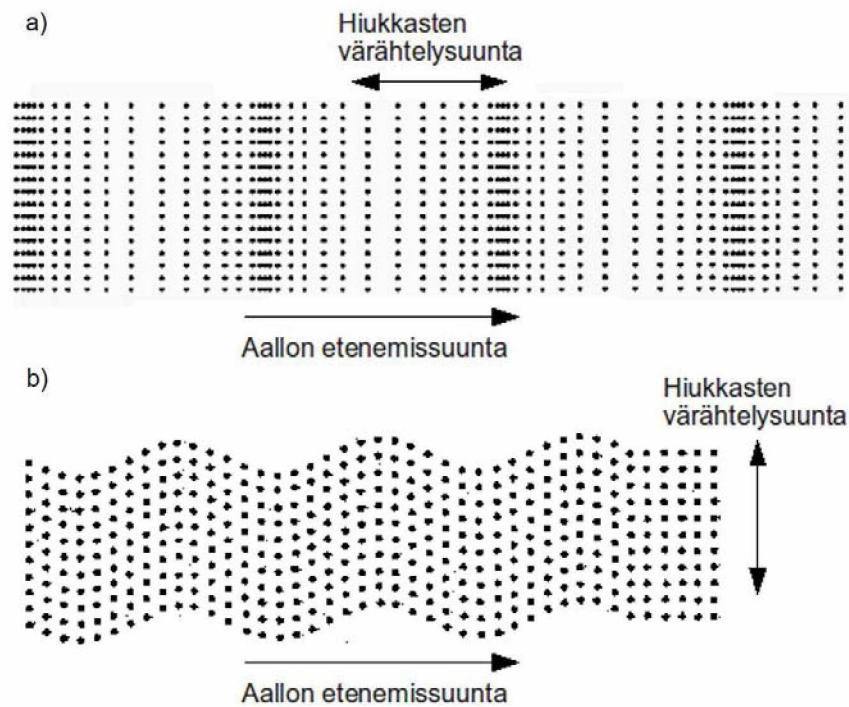
Teoria

Ultraääni on ääntä, jonka taajuus on ihmisen kuuloalueen yläpuolella. Ultraäänialueen alarajaksi on määritelty 20 000 Hz. Yksikkö hertsi (Hz) tarkoittaa värähdysten määrää yhden sekunnin aikana. Koska ääni on aineen mekaanista värähtelyä, se ei voi edetä tyhjiössä, jossa hiukkasia ei ole. Väliaine, jonka ääniaalto vaatii edetäkseen, voi olla kiinteä, neste tai kaasu. [66] Ääniaalto etenee parhaiten kiinteässä ja heikoiten kaasumaisessa väliaineessa [70].

Ääniaalto vaimenee kulkiessaan materiaalissa absorption ja sironnan vuoksi. Absorptiossa osa ääniaallon mekaanisesta värähtelystä muuttuu lämmöksi. Sironnassa rae-rajat, mikrohalkeamat ja muut vastaavat pienet epäjatkuvuuskohdat aiheuttavat äänen heijastumista ja taittumista, siten hävittäen osan ääniaallon energiasta. Vaimeneminen rajoittaa suurinta syvyyttä, jolta epäjatkuvuuskohtia voidaan havaita. [68]

Ultraäänitarkastuksessa käytetään pääasiallisesti kahden tyyppisiä aaltoja, pitkittäisiä eli puristusaaltoja (compressive wave) ja poikittaisia eli leikkausaaltoja (shear wave) (Kuva 45). Puristusaallossa aineen hiukkaset värähtelevät edestakaisin aallon etenemissuunnassa. Leikkausaallossa aineen hiukkaset värähtelevät kohtisuorassa

suunnassa aallon etenemissuuntaan nähden. Leikkausaaltoja ei esiinny kuin kiinteissä aineissa. Puristus- ja leikkausaaltojen lisäksi tietyissä tapauksissa hyödynnetään myös pinta-aaltoja, kuten Rayleigh- ja Lamb-aaltoja. Rayleigh-aallot etenevät massiivisen kappaleen pinnalla, samaan tapaan kuin aallot veden pinnalla. Lamb-aallot etenevät aallon aallonpituuteen nähden ohuessa levyssä, koko levyn paksuudessa. [71]



Kuva 45 a) Puristusaalto ja b) leikkausaalto [70].

Ääniaallon nopeus materiaalissa riippuu materiaalin kimmo-ominaisuuksista ja tiheydestä sekä ääniaallon tyypistä. Yleisesti metalleissa leikkausaallon nopeus on noin puolet puristusaallon nopeudesta. [71]

Ääniaallon aallonpituus määräytyy taajuuden ja aallonnopeuden perusteella seuraavasti [70]:

$$\lambda = \frac{V}{f}, \quad (6.1)$$

jossa λ on aallonpituus, V on äänennopeus ja f on taajuus. Kaavasta 6.1 nähdään, että aallonpituus pienenee taajuuden kasvaessa. Esimerkiksi käytettäessä 5 MHz taajuutta puristusaallon aallonpituudeksi kiskoteräksessä ($V_c = 5600$ m/s) saadaan noin 1,12 mm. Aallonpituus vaikuttaa tarkastukseen seuraavasti:

1. Mitä lyhyempää aallonpituutta käytetään, sitä pienempiä epäjatkuvuuskohtia on mahdollista havaita. Pienin havaittava epäjatkuvuuskohta vastaa kooltaan noin puolta aallonpituutta. Siten suuremman tarkastustaajuuden avulla voidaan havaita pienempiä epäjatkuvuuskohtia. [70]
2. Mitä lyhyempi aallonpituus on, sitä enemmän ääniaalto vaimenee siroamisen vuoksi. Siten suurempi tarkastustaajuus johtaa pienempään tarkastussyvy-

teen. Siroaminen on voimakkainta kun aallonpituus on alle kolmanneksen materiaalin raekoosta. [70] Tämän vuoksi valettujen tuotteiden (suuri raekoko) tarkastukseen käytetään tavallisesti matalampia taajuuksia kuin muokattujen tuotteiden (hieno raekoko) tarkastukseen [67].

3. Mitä lyhyempi aallonpituus on, sitä vähemmän ultraäänikeila laajenee edessään materiaalissa.

Edellä esitettyjen kohdan 1 ja 2 perusteella voidaan todeta, että tarkastustaajuuden valinta on kompromissi pienimmän havaittavan epäjatkuvuuskohdan ja halutun tunkeumasyvyyden välillä.

Kun ultraääni kohtaa kahden eri materiaalin rajapinnan, osa aallon energiasta transmittoituu eli kulkeutuu rajapinnan ylitse toiseen materiaaliin ja osa heijastuu. Transmittoituneen ja heijastuneen energian osuus riippuu kullekin materiaalille ominaisesta akustisesta impedanssista. Akustinen impedanssi (Z) määräytyy materiaalin tiheyden (ρ) ja äänen nopeuden (V) perusteella seuraavasti [71]:

$$Z = \rho V \quad (6.2)$$

Mitä lähempänä toisiaan kahden materiaalin akustiset impedanssit ovat, sitä suurempi osa ääniaallon energiasta transmittoituu. Vuorostaan, mikäli akustiset impedanssit eroavat huomattavasti toisistaan, heijastuu suurin osa ääniaallosta rajapinnasta. Kuten taulukossa 10 esitetään, on ilman akustinen impedanssi teräkseen nähden häviävän pieni ja siten teräksen ja ilman välisellä rajapinnalla tapahtuu lähes täydellinen heijastus. Kun ultraäänilaitteistolla luodataan kappaletta, havaitaan sen takapinnasta heijastuvan voimakas kaiku. Mikäli kappaleessa on särö, aiheuttaa se takapinnan tavoin heijastuksen, joka havaitaan taustaa aiemmin palaavana kaikuna. [71]

Taulukko 10 Teräksen, veden ja ilman ultraäänitarkastuksen kannalta merkittäviä ominaisuuksia [67].

Materiaali	Äänennopeus materiaalissa		Tiheys [g/cm ³]	Akustinen Impedanssi [g/(cm ³ s)]
	Puristusaalto	Leikkausaalto		
Teräs	5890	3240	7,71	45,41 · 10 ⁵
Vesi	1480	-	1,00	1,483 · 10 ⁵
Ilma	344	-	1,205 · 10 ⁻³	0,415

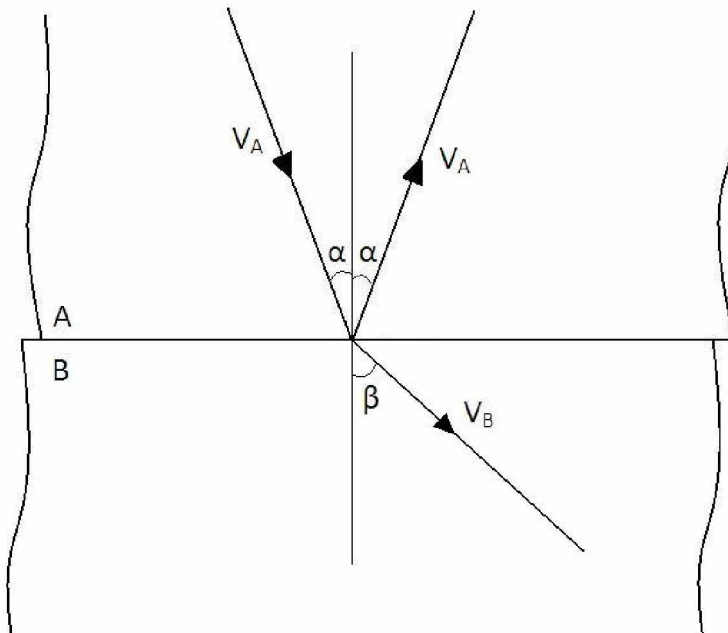
Leikkausaalto ei voi edetä kuin kiinteässä aineessa, jonka vuoksi kiinteän ja nesteen sekä kiinteän ja kaasun välisellä rajapinnalla leikkausaallolla tapahtuu aina kokonaisheijastus. [71]

Koska ääniaallot kulkevat heikosti ilmassa, tarvitsee ultraääniluotaimen ja luodattavan kappaleen välillä useimmiten käyttää kytkentäainetta, kuten vettä, liisteriä tai tarkoitukseen soveltuvaa geeliä, jotta riittävä osuus äänienergiasta transmittoituu luotaimesta kappaleeseen ja takaisin kappaleesta luotaimen.

Kun ääniaalto kulkeutuu akustiselta impedanssiltaan erilaisesta materiaalista toiseen, muuttaa se samalla kulkusuuntaansa. Transmitoituneen ääniaallon kulkusuunta saadaan laskettua Snellin lain avulla [71]:

$$\frac{\sin(\alpha)}{\sin(\beta)} = \frac{V_A}{V_B}, \quad (6.3)$$

jossa α on tulevan aallon ja rajapinnan normaalin välinen kulma, β on transmitoituneen aallon ja rajapinnan normaalin välinen kulma, V_A on äänennopeus materiaalissa A ja V_B on äänennopeus materiaalissa B (Kuva 46). Materiaalissa A heijastuneen aallon lähtökulma vastaa tulevan aallon tulokulmaa.



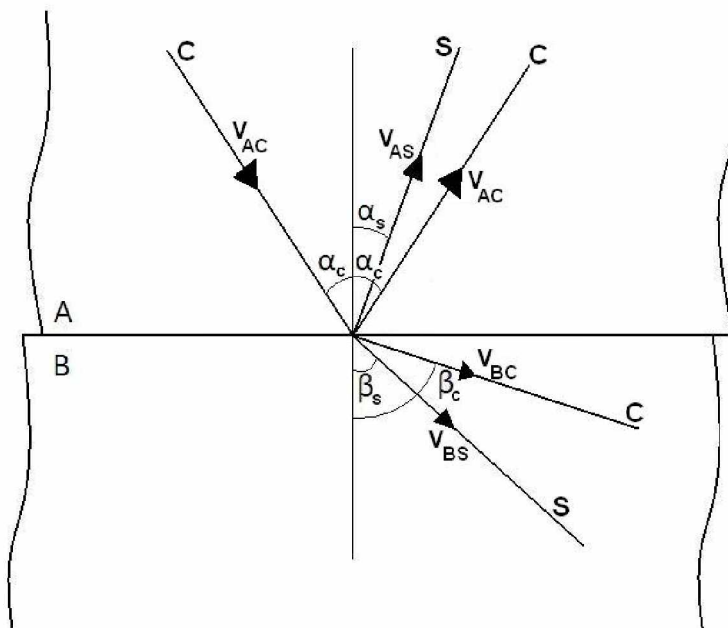
Kuva 46 Tuleva, heijastunut ja transmitoitunut aalto kahden materiaalin rajapinnassa.

Snellin laista seuraa, että kun äänennopeus materiaalissa A on pienempi kuin materiaalissa B ($V_A < V_B$), muodostuu transmitoituneen säteen kulma β tulevan aallon kulmaa α suuremmaksi eli transmitoitunut aalto kääntyy lähemmäksi rajapintaa. Tällöin tietyllä kulmalla α kulma β saavuttaa arvon 90 astetta, eikä materiaaliin B transmitoidu energiaa. Kyseistä α -kulman arvoa kutsutaan ensimmäiseksi kriittiseksi kulmaksi.

Kun ääniaalto kohtaa kahden akustiselta impedanssiltaan erilaisen materiaalin rajapinnan pinnan normaalista poikkeavassa kulmassa, voi osa aallon energiasta muuntua toiseksi aaltomuodoksi. Tämä tarkoittaa, että vinossa kulmassa rajapinnan kohtaava puristusaalto tuottaa transmitoituneen puristus- sekä leikkausaallon (Kuva 47). Myös aallon heijastuessa voi tapahtua aaltomuodon muunnos. Koska Snellin laki on voimassa sekä puristus- että leikkausaallolle, voidaan se kirjoittaa muotoon [71]:

$$\frac{\sin(\alpha)}{V_{Ac}} = \frac{\sin(\beta_c)}{V_{Bc}} = \frac{\sin(\beta_s)}{V_{Bs}}, \quad (6.4)$$

jossa α on puristusaallon tulokulma, β_c on transmittoituneen puristusaallon lähtökulma, β_s on transmittoituneen leikkausaallon lähtökulma, V_{Ac} ja V_{Bc} ovat puristusaaltojen nopeudet materiaaleissa A ja B ja V_{Bs} on leikkausaallon nopeus materiaalissa B. Koska leikkausaallon nopeus on puristusaallon nopeutta pienempi, on leikkausaallon lähtökulma β_s puristusaallon lähtökulmaa β_c pienempi. Tämän seurauksena kun tulokulma α on suurempi kuin ensimmäinen kriittinen kulma, on materiaalissa B ainoastaan leikkausaaltoja. Kun tulokulmaa yhä kasvatetaan, saavuttaa myös leikkausaaltojen lähtökulma β_s lopulta arvon 90 astetta. Tätä α -kulman arvoa kutsutaan toiseksi kriittiseksi kulmaksi.



Kuva 47 Aaltomuodon muunnos kahden materiaalin rajapinnassa. Kuvassa C tarkoittaa puristus- ja S leikkausaaltoja.

Toista kriittistä kulmaa suuremmilla tulokulman arvoilla materiaalissa B ei etene aaltoja. Toista kriittistä kulmaa vastaavilla tulokulman arvoilla rajapintaan muodostuu Rayleigh- eli pinta-aaltoja. Lamb-aaltojen tuottaminen aaltomuodon muunnoksen avulla on vaikeaa, mutta mahdollista. Niitä voidaan tuottaa levymäiseen kappaleeseen kohdistamalla siihen sopivan taajuinen puristusaalto sopivassa tulokulmassa. [67, 71]

Kriittisten kulmien suuruudet riippuvat Snellin lain mukaisesti äänennopeuksista materiaaleissa. Kriittiset kulmat eri aineilla voidaan laskea Snellin lain avulla käyttäen kulmalle β arvoa 90 astetta. Tällöin Snellin laista saadaan [70]:

$$\sin(\alpha_{crit1}) = \frac{V_A}{V_{Bc}}, \quad (6.5)$$

$$\sin(\alpha_{crit2}) = \frac{V_A}{V_{Bs}}, \quad (6.6)$$

joissa α_{crit1} on ensimmäinen ja α_{crit2} toinen kriittinen kulma, V_A on äänennopeus materiaalissa A, V_{Bc} on puristus- ja V_{Bs} leikkausaallon nopeus materiaalissa B.

Teräksen ultraäänitarkastuksessa käytettyjen kulmaluotainten kiilat on tavallisesti valmistettu akryylistä. Kaavoilla 6.5 ja 6.6 laskemalla, käyttäen materiaalina A akryyliä (puristusaallon nopeus 2670 m/s) ja materiaalina B terästä (äänennopeudet Taulukko 10) ensimmäisen kriittisen kulman arvoksi saadaan noin 27 astetta ja toisen kriittisen kulman arvoksi noin 55 astetta.

Ultraäänitarkastus tehdään tavallisesti sellaisia tarkastuskulmia käyttäen, joilla tarkastettavaan materiaaliin syntyy ainoastaan yhden tyyppistä aaltoa. Mikäli kappaleeseen synnytetään samanaikaisesti sekä puristus- että leikkausaaltoja, voi heijastusten tulkinta muodostua monimutkaiseksi. [70] Tarkastuksessa käytetään siten:

- Pintaan nähden kohtisuorassa kulmassa olevia normaaliluotaimia, joilla tuotetaan puristusaaltoja.
- Pintaan nähden vinossa kulmassa, ensimmäisen ja toisen kriittisen kulman välillä olevia kulmaluotaimia, joilla tuotetaan leikkausaaltoja.
- Pintaan nähden vinossa kulmassa, yli toisen kriittisen kulman olevia kulmaluotaimia, joilla tuotetaan pinta-aaltoja.

Jotta epäjatkuvuuskohdasta saadaan ultraäänitarkastuksessa kaiku, on sen tai sen osan oltava aaltoa kohtaan kohtisuorassa kulmassa, jolloin aalto heijastuu takaisin luotaimen. Täten eri kulmassa olevia luotaimia voidaan käyttää erilaisten vikojen paikantamiseen. Normaalikulmassa olevalla luotaimella voidaan havaita vaakasuuntaisia säröjä, kuten pinnan sälöilyä. 45 asteen kulmassa olevalla luotaimella voidaan havaita sidekiskon rei'istä alkaneita säröjä, jotka kasvavat tavallisesti 45 asteen kulmassa pintaan nähden. 70 asteen luotaimella voidaan havaita poikittaisia vikoja. [9]

Ultraääniluotaimen ääntä tuottavan piezokiteen edessä esiintyy lähikentäksi (near field, Fresnel zone) kutsuttu alue. Lähikentässä ääniaaltorintama on intensiteetiltään epätasainen. Lähikentän takaosassa ääniaallot yhdistyvät muodostaen tasaisen aaltorintaman. Lähikentän takana olevaa, intensiteetiltään tasaista aluetta kutsutaan kaukokentäksi (far field, Fraunhofer zone). Lähikentän epätasaisen intensiteetin vuoksi sen alueelle osuvia epäjatkuvuuskohtia ei voida havaita luotettavasti. Tämän vuoksi tavallisella pintaan nähden normaalissa kulmassa olevalla luotaimella ei voida havaita pinnan läheisyydessä olevia epäjatkuvuuskohtia. Lähikentän pituus riippuu äänen aallonpituudesta ja luotaimen kiteen halkaisijasta. Tavallisesti lähikentän pituus on luokkaa 5 – 30 mm. [67]

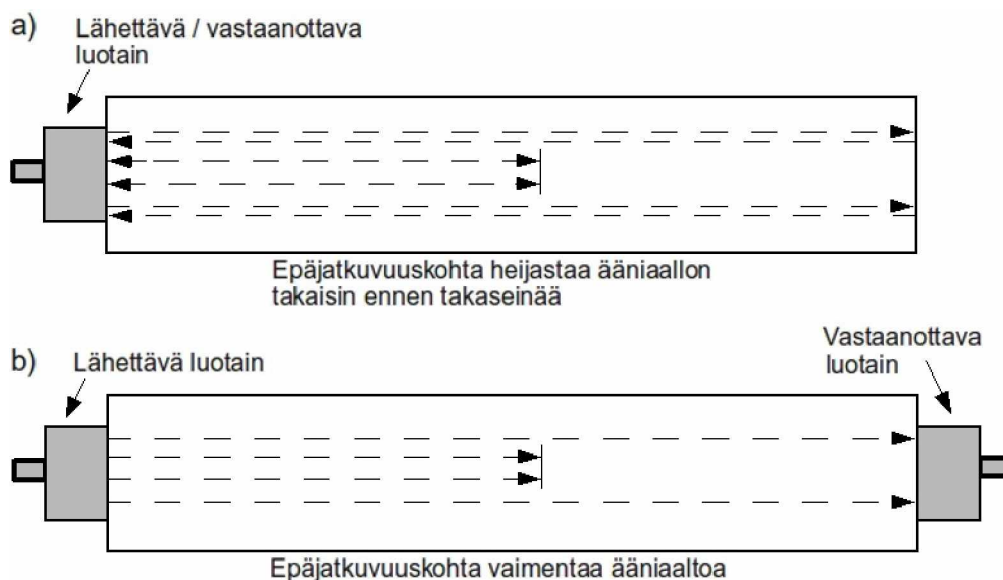
Kulma- ja dual element -luotaimissa lähikenttä voi rajoittua luotaimen kärjessä olevan akryylikiilan sisälle. Täten tarkastettava kappale on pinnasta alkaen luotaimen kaukokentässä ja pintaa lähellä olevien epäjatkuvuuskohtien havaitseminen kyseisillä luotaimilla on mahdollista.

Tarkastustekniikat

Ultraäänitarkastuksessa, jossa luotain ja tarkastettava kappale ovat kosketuksissa, käytetään tavallisesti niin kutsuttua pulssikaikutekniikkaa. Pulssikaikutekniikassa käytetään yksittäistä luotainta, jolla kappaleeseen ensin tuotetaan äänipulssi ja joka tämän jälkeen havaitsee äänipulssin aiheuttamat kaiut kappaleessa. Kaiujen viivees-

tä ja voimakkuudesta voidaan päätellä onko ääniaallon matkalle osunut epäjatkuvuuskohtia tai heijastuuko kaiku kappaleen takaseinästä. Toinen tekniikka on transmissiotekniikka, jossa äänipulssi lähetetään yhdellä luotaimella ja vastaanotetaan toisella. Tällä tekniikalla epäjatkuvuuskohtien havaittavuus perustuu ääniaallon vaihteluun. [71] Kuvassa 48 on esitetty pulssikaiku- ja transmissiotekniikoiden periaatteet.

Koska ultraääni heijastuu ensimmäisestä säröstä, jonka se kohtaa, voi lähelle pintaa muodostunut vaakasuuntainen särö peittää allaan olevan, kiskon kestävyys kannalta kriittisemmän poikittaisen halkeaman. Samalla tavoin tiheään ydintyviin vierintäväsymissäröjen seasta on hyvin vaikeaa havaita poikittaiseksi halkeamaksi kasvaneita säröjä, sillä loivassa kulmassa kasvavat säröt estävät allaan olevien säröjen havaitsemisen. Havaitsematta jääneet poikittaiset säröt voivat kasvaa kriittisen suuriksi ja aiheuttaa kiskon murtumisen.



Kuva 48 a) Pulssikaikutekniikan ja b) transmissiotekniikan periaatteet.

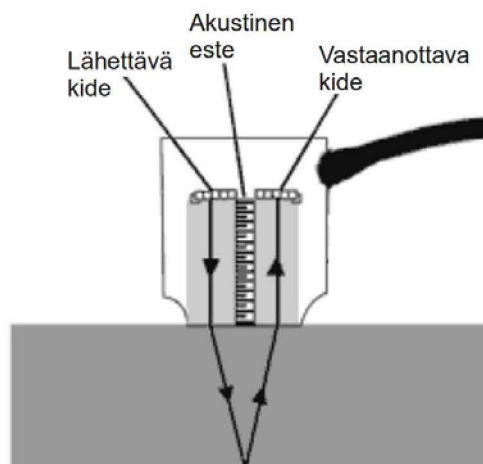
Luotain

Perinteisessä ultraäänitarkastuksessa, jossa luotain ja testattava kappale ovat kosketuksessa, käytetään piezokiteisiä luotaimia. Piezokiteet on valmistettu piezosähköisestä materiaalista, kuten kvartsista. Muun muassa myös tietyillä teollisesti tuotetuilla keraameilla on piezosähköisiä ominaisuuksia. Piezosähköisillä ominaisuuksilla tarkoitetaan materiaalin kykyä reagoida sähkövirtaan muotoaan muuttamalla sekä päinvastoin, tuottamalla sähkövirtapulssi, kun sitä muokataan. Kun piezokiteeseen johdetaan muuttuva jännite, värähtelee se mekaanisesti tuottaen ääntä. Siten piezosähköisiä luotaimia voidaan käyttää sekä signaalin lähettämiseen että vastaanottamiseen. [67, 71] Piezokiteet valmistetaan joko ympyrän tai suorakulmion mallisiksi. Halkaisijaltaan ne ovat tavallisesti 6 – 30 mm.

Luotainta, jossa yksittäinen kite lähettää ja vastaanottaa äänisignaalin, kutsutaan yksikideluotaimeksi (single crystal). Luotain lähettää ensin lyhytkestoisen pulssin, jonka jälkeen se jää vastaanottamaan palaavia kaikuja.

Pintaan nähden normaalissa kulmassa olevien luotaimien lisäksi on olemassa kulma-luotaimia. Niissä luotaimen päähän on asetettu sopivasta materiaalista, yleensä akryylimuovista valmistettu kiila, jonka avulla ääniaalto on mahdollista saattaa kappaleeseen tiettyssä kulmassa. Koska ääniaallon taittuminen kahden materiaalin rajapinnassa riippuu Snellin lain mukaisesti äänennopeuksista materiaaleissa, riippuu kulmaluotaimella saavutettava todellinen tarkastuskulma äänennopeudesta tarkastettavassa materiaalissa. Useimmiten kiilassa ilmoitetaan tarkastuskulma teräksessä, mutta muitakin mahdollisuuksia on. Täten kiilaa käytettäessä tulee tietää, merkitseekö kyseisessä kiilassa mainittu kulma kiilan geometrista muotoa vai tarkastuskulmaa tiettyssä materiaalissa. Kun tarkastettavan materiaalin ja materiaalin, johon ilmoitettu tarkastuskulma liittyy, äänennopeudet tunnetaan, voidaan todellinen tarkastuskulma tarkastettavassa materiaalissa laskea Snellin lain avulla.

Yksikiteisten luotaimien ohelle on kehitetty kaksoiskideluotaimia (dual element). Ne sisältävät kaksi kideä, joista toinen lähettää ja toinen vastaanottaa signaalin (Kuva 49). Kiteiden välissä on akustinen vaimenninkerros. Kaksoiskideluotaimella saavutetaan yksikideluotainta parempi signaali ja sen avulla on mahdollista havaita lähempänä pintaa olevia epäjatkuvuuskohtia. Lähettävä ja vastaanottava kide ovat tavallisesti asetettu luotaimen pieneen kulmaan toisiaan kohti siten, että kappaleeseen lähetetty ääniaalto heijastuu luotainta vasten tietyllä etäisyydellä olevasta koh-tisuorasta pinnasta vastaanottavaan kiteeseen. [67] Kaksoiskideluotainten käyttö on perusteltua esimerkiksi, kun tarkastettavan kappaleen etu- ja takapinta eivät ole yhdensuuntaisia tai kappale on ohut (paksuus alle 13 mm) [70]. Ratakiskojen ultraääni-tarkastuksessa kaksoiskideluotaimia käytetään lähellä pintaa olevien vikojen havaitsemiseen.

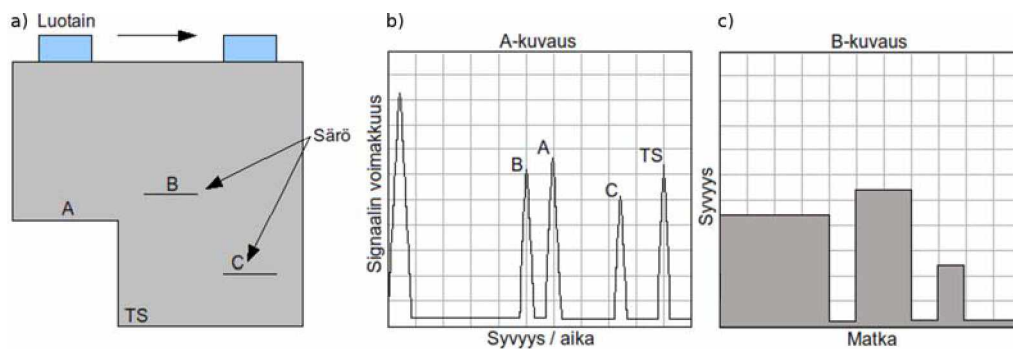


Kuva 49 Dual element -luotaimen periaatepiirros [67].

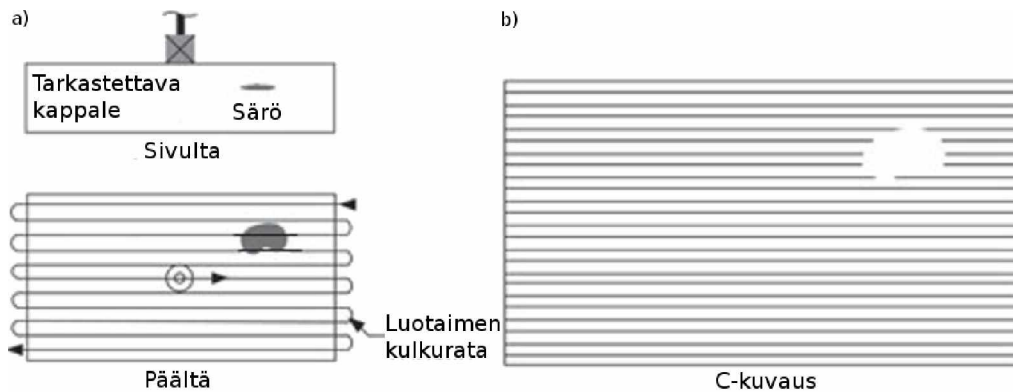
Kuvausmenetelmät

Koska äänennopeus on tasalaatuisessa materiaalissa vakio, voidaan tarkastettavasta kappaleesta havaittavien kaikuja palaamisajan perusteella laskea syvyys, jolta kaiku palaa. Pulssikaikutekniikalla kappaleesta havaittavat kaiut on mahdollista kuvantaa kolmella eri tavalla, A-, B- ja C-kuvauksella (A-, B-, C-scan).

- A-kuvaus on tavoista yksinkertaisin. Siinä ultraäänilaitteen kuvaruudulla esitetään kuvaaja, jonka vaaka-akselilla on etäisyys jolta kaiku palaa ja pystyakselilla kaiun intensiteetti (Kuva 50b).
- B-kuvaus tuottaa kappaleen poikkileikkausta vastaavan kuvan. Pystyakselille kuvantuu epäjatkuvuuskohdan syvyys ja vaaka-akselille sijainti luotaimen kulkemalla matkalla (Kuva 50c). B-kuvaus edellyttää luotaimelta kykyä mitata kuljettua matkaa.
- C-kuvaus tuottaa kappaleen läpileikkausta vastaavan kuvan (Kuva 51b). Kuva tuotetaan liikuttamalla luotainta kappaleen pinnalla järjestelmällisesti. C-kuvaus edellyttää laitteistolta kykyä seurata luotaimen sijaintia pinnalla. Kuvantuvien kaikujen syvyydet on mahdollista esittää esimerkiksi sävyeroina.



Kuva 50 Ultraäänitarkastuksessa käytettävät A- ja B-kuvaus. a) Todellinen kappale, joka tarkastetaan. b) A-kuvaus. Piikit A, B ja C ovat vuorollaan näkyvissä, kun luotain on vastaavan kohdan päällä. TS kuvaa takaseinästä saatavaa kaikua. c) B-kuvaus.



Kuva 51 Ultraäänitarkastuksessa käytettävä C-kuvaus. a) Todellinen kappale sivulta ja päältä. b) C-kuvaus kappaleesta. [67]

Kiskojen ultraäänitarkastus

Rautateillä tapahtuvaan kiskojen ultraäänitarkastukseen käytetään sekä käsikäyttöisiä tarkastuslaitteita että automatisoitua tarkastuskalustoa.

Laajamittaisessa tarkastuksessa viat paikannetaan aluksi tarkastuskalustoa tai -jalustaa käyttäen. Havaitut viat varmennetaan ja karakterisoidaan käsikäyttöisellä ultraäänitarkastuslaitteella eri kulmissa olevia luotaimia hyväksi käyttäen.

Tavallinen käsikäyttöinen ultraäänilaitteisto koostuu ultraäänilaitteesta, luotaimesta ja luotaimen ultraäänilaitteeseen yhdistävästä välikaapelista. Itse ultraäänilaitteen tehtävänä on tuottaa luotaimelle sopiva tarkastussignaali ja esittää graafisesti luotaimelle palanneet kaiut. Normaalilla käsikäyttöisellä luotaimella tehtävä tarkastus kuvantuu A-kuvauksella. Kokeneen käyttäjän on mahdollista selvittää käsikäyttöisellä ultraäänilaitteella havaitun vian koko, sijainti ja muoto.

Ultraäänitarkastusjalusta on pyörillä liikkuva, kiskon päällä työnnettävä tai moottorin avulla liikkuva laite, johon on kiinnitetty ultraäänitarkastuslaite, vesisäiliö ja luotaimet. Vesisäiliöstä johdetaan vettä kiskolle luotaimien eteen kytkentäaineeksi hyvän signaalinkulun takaamiseksi. Jalustassa on tavallisesti useita luotaimia asetettuna luotaamaan eri suuntiin. Jalustan on mahdollista mitata myös kuljettua matkaa, jonka ansiosta tarkastustulokset voidaan kuvata B-kuvauksella. Kuvassa 52 on esitetty yhdenlainen ultraäänitarkastusjalusta.



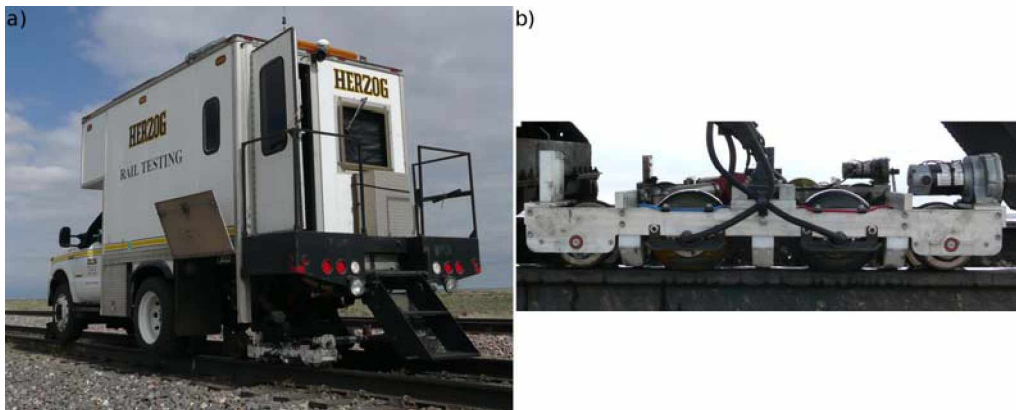
Kuva 52 Ultraäänitarkastusjalusta [72].

Ultraäänitarkastuskalustona voi olla joko kiskoilla ja tiellä kulkevia Hi-Rail -ajoneuvoja (Kuva 53a) tai pelkästään kiskoilla kulkevia tarkastusvaunuja. Tarkastusvaunuilla päästään käsikäyttöisiä tarkastuslaitteita huomattavasti suurempiin tarkastusnopeuksiin. Esveldin [17] mukaan tarkastusvaunuilla on mahdollista tarkastaa rataa jopa 75 km/h nopeudella. Nopeuden kasvaessa tarkastuksen laatu kuitenkin heikenee. Automatisoidulla tarkastuskalustolla tarkastus on mahdollista tehdä joko non-stop- tai stop and verify -menetelmällä. Non-stop-menetelmässä tarkastuskalusto ajaa pysähtymättä ja merkitsee havaitsemansa mahdolliset viat esimerkiksi automaattisella maalimerkillä kiskon kylkeen. Tällä tavoin toinen tarkastusryhmä voi hoitaa havaintojen varmennuksen, eikä tarkastuskaluston käyttöaikaa kulu käsintarkastukseen. Stop and verify -menetelmässä tarkastuskalusto pysähtyy joka havainnon kohdalla ja tarkastuskaluston henkilöstö varmentaa havainnot. Pysähdysten seurauksena keskimääräinen tarkastusnopeus laskee huomattavasti.

Tarkastuskalustossa oleva tarkastaja seuraa kaluston alla kiskoa tarkkailevien luotaimien tuottamia signaaleja tavallisesti B-kuvauksen avulla. Luotaimien signaalit on mahdollista nauhoittaa jäljempänä tapahtuvaa tarkastelua varten.

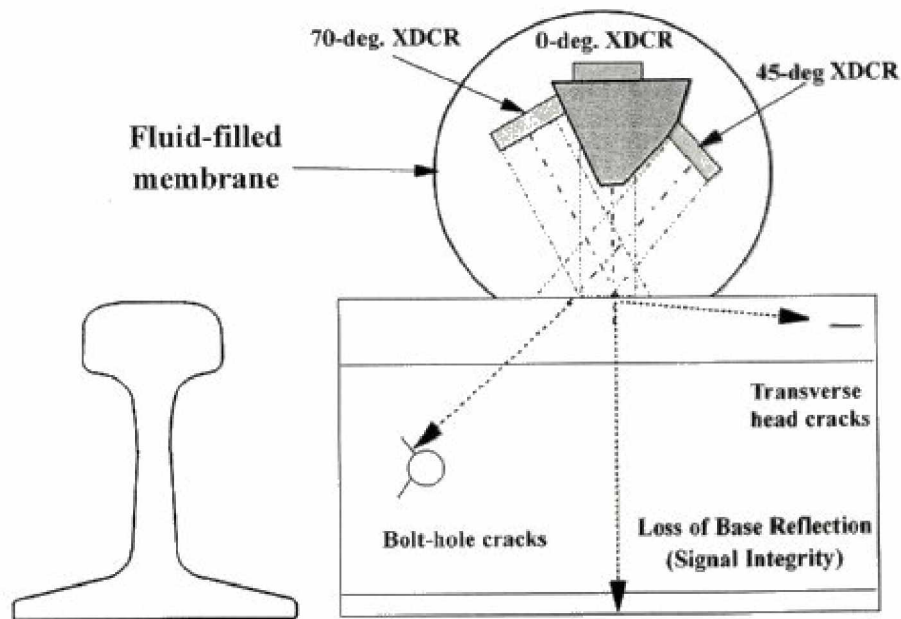
Tarkastuskalustossa luotaimet on sijoitettu erilliseen, pienten pyörien varassa kiskoilla kulkevaan kelkkaan. Luotaimet voivat olla asennettuna joko kiskonpintaa pitkin laahaavaan kenkään tai rullatarkastusyksikköön. Rullatarkastusyksikkö on nesteellä täytetty kumipyörä. Kuvassa 53b on esitetty kiskolla kulkeva kelkka, jossa on kaksi rullatarkastusyksikköä. Tavallisesti yhtä kiskoa kohti on kaksi rullatarkastusyksikköä, joista jokaisessa on kolmesta kuuteen luotainta. Luotaimet on asetettu eri kulmiin, jotta eri suuntiin kasvavia vikoja voitaisiin havaita mahdollisimman tehokkaasti. Yksi rullatarkastusyksikkö voi esimerkiksi sisältää seuraavanlaiset luotaimet [73]:

- Yhden 0 asteen kulmassa olevan luotaimen, jolla pyritään havaitsemaan säilöilyä ja vaakasuuntaisia säröjä.
- Yhden 45 asteen kulmassa olevan luotaimen, jolla pyritään havaitsemaan pultinrei'istä alkaneita säröjä.
- Kolme 70 asteen kulmassa olevaa luotainta, joista yksi on sijoitettu kiskon keskilinjalle ja kaksi keskilinjan sivuille, jotta tarkastus kattaa mahdollisimman suuren osan hamarasta. Näillä pyritään havaitsemaan poikittaisia säröjä.
- Yhden sivusuunnassa vinossa kulmassa olevan luotaimen, jolla pyritään havaitsemaan pitkittäisiä pystysuuntaisia säröjä.



Kuva 53 a) Hi-Rail-ultraäänitarkastusajoneuvo. b) Kaksi rullatarkastusyksikköä kantava teline.

Toisen kelkassa olevan rullatarkastusyksikön kulmaluotaimet on suunnattu eteen- ja toisen taaksepäin, jotta eri orientaatioihin kasvavat säröt saataisiin havaituksi. Kuvassa 54 on esitetty havainnekuva rullatarkastusyksikössä olevista luotaimista.



Kuva 54 Havainnekuva rullatarkastusyksikössä olevista eri suuntiin kohdistetuista luotaimista [67].

Ultraäänitarkastuksen etuja ja heikkouksia

Ultraäänitarkastuksen etuja ovat:

- Halkeamatyyppisten virheiden havaittavuus hyvä, edellyttäen että halkeama on tarkastukseen nähden edullisesti suuntautunut.
- Hyvä tunkeutumiskyky eli mahdollisuus havaita syvällä kappaleessa olevia virheitä.
- Pulssikaikutekniikalla tarkastus voidaan tehdä yhdeltä pinnalta.
- Vian sijainnin tarkka määrittäminen on mahdollista.

Ultraäänitarkastuksen heikkouksia ovat:

- Lähellä pintaa olevien epäjatkuvuuskohtien heikko havaittavuus.
- Pintaa lähellä olevat vaakasuuntaiset säröt voivat peittää allaan olevat kriittisemmät säröt.
- Kiskon päältä tehtävässä tarkastuksessa osa kiskosta, esimerkiksi jalan reunat, on ultraäänikeiloen katvealueella, jonka vuoksi niissä olevia epäjatkuvuuskohtia ei havaita.
- Onnistunut tarkastus vaatii tarkastajalta korkeaa ammattitaitoa.

6.1.4 Pyörrevirtatarkastus

Pyörrevirtatarkastus on sähkömagneettiseen induktioon perustuva tarkastusmenetelmä, jolla voidaan havaita sähköä johtavan kappaleen pinnalla tai pinnan läheisyydessä olevia epäjatkuvuuskohtia. Pyörrevirtatarkastuksessa käytetään tarkastuskelaa, jossa kulkee vaihtovirta. Vaihtovirta aiheuttaa kelan ympärille muuttuvan magneettikentän. Kun tarkastuskela tuodaan tarkastettavan kappaleen lähelle, indusoi muuttuva magneettikenttä tarkastettavaan kappaleeseen pyörrevirtoja. Nämä pyörrevirrat

puolestaan aiheuttavat tarkastuskelan magneettikenttää vastustavan sekundäärisen magneettikentän kappaleeseen. Kappaleessa esiintyviä epäjatkuvuuskohtia voidaan havaita tarkkailemalla tarkastuskelassa tapahtuvia muutoksia. [68]

Pyörrevirtatarkastuksen herkkyys heikkenee nopeasti tarkastussyvyyden mukana, sillä pyörrevirtojen tiheys kappaleessa vähenee syvyyden mukana eksponentiaalisesti. Etäisyyttä pinnasta, jolla pyörrevirtojen määrä on vähentynyt $1/e$ (e on luonnollinen luku, 2,87) osaan pinnalla esiintyvistä tiheydestä, kutsutaan tunkeumasyvyydeksi. Yli kolmen tunkeumasyvyyden etäisyydellä kappaleen pinnasta saatava signaali on niin heikko, ettei sitä saada enää näkyviin. Teräksissä tunkeumasyvyyden suurimmillaan millimetrien luokkaa. [68, 66]

Tunkeumasyvyyteen vaikuttavat tarkastettavan materiaalin sähkönjohtavuus ja permeabiliteetti sekä käytetty tarkastustaaajuus. Matalammalla tarkastustaaajuudella päästään korkeampaan tunkeumasyvyyteen, mutta epäjatkuvuuskohtien havaittavuus kärsii. Täten käytännössä tarkastus tehdään korkeimmalla tarkastustaaajuudella, jolla vielä päästään haluttuun tarkastussyvyyteen. Pyörrevirrat tunkeutuvat huonosti ferromagneettisiin materiaaleihin, joihin kiskoteräksikin kuuluvat. Tämän vuoksi kiskon tarkastuksessa käytetään matalia, alle 200 kHz taajuuksia. [68]

Koska pyörrevirtatarkastuksella ei ole mahdollista havaita syvällä kiskossa olevia epäjatkuvuuskohtia, ovat sen käyttömahdollisuudet rajoittuneet ultraäänitarkastusta täydentäväksi menetelmäksi. Pyörrevirtatarkastusta käytetään erityisesti vierintäväsäröjen vakavuuden määrittämiseen [74].

6.1.5 Induktio tarkastus

Induktio tarkastusta on mahdollista käyttää ultraäänitarkastuksen apuna, erityisesti vaikeiden vikojen, kuten lähellä kulkureunaa olevien poikittaisten säröjen havaitsemiseen. Siihen tarvittavat laitteistot ovat tosin suurikokoisia ja siten niitä voidaan käyttää ainoastaan tarkastusvaunuissa. [73]

Induktio tarkastuksessa kiskon hamaraan johdetaan voimakas tasavirta, tavallisesti 1200–3600 A. Virta johdetaan kiskon hamaraan elektrodilla, josta se kulkee toiseen, noin 1,2 m päässä olevaan elektrodiin. Kiskossa kulkeva sähkövirta tuottaa hamaran ympärille magneettikentän. Mikäli kiskon hamarassa on epäjatkuvuuskohtia, vääristävät ne magneettikenttää. Magneettikentän vääristymät havaitaan elektrodien väliin sijoitetuilla sensoreilla. Kun sensorien havaitsema vääristymä on tiettyä kriteeriä suurempi, antaa laitteisto havainnosta ilmoituksen tarkastajalle, joka arvioi havainnon vakavuuden. [75]

6.2 Tarkastustiheydet

Suurin osa kiskoihin muodostuvista vioista ei välittömästi johda kiskon murtumiseen, vaan ne kasvavat ajan ja kuormituksen mukana vähitellen. Koska tarkastusmenetelmien rajallisesta herkkyydestä johtuen niillä on mahdollista havaita ainoastaan tiettyä kokoa suurempia vikoja, on vian tarkastuksen hetkellä oltava riittävän suuri, jotta se voidaan havaita. Ajan ja kuormituksen myötä vika voi kasvaa yli kriittisen kokonsa eli niin suureksi, että se voi johtaa kiskon murtumaan ja siten vaarantaa liikenteen toimivuuden.

Näiden pohjalta tarkastus on tehtävä silloin, kun vika on kooltaan pienimmän havaittavan vian ja kriittisen kokonsa välillä. Kuitenkin, koska kiskoon syntyy uusia vikoja jatkuvasti, ei ole mahdollista määrittää kiskon elinkaareissa sellaista yksittäistä tarkastusajankohtaa, jossa kaikki viat olisivat tuolla kokovälillä. Tämän vuoksi tarkastuksia on tehtävä tietyin määräväliajoin. Tarkastusten välillä olevan ajan on oltava riittävän lyhyt, jotta yksittäinen vika ei tuona aikana ehdi kasvamaan alle havaittavasta koosta yli kriittisen kokonsa.

Mikäli tarkastuksia tehdään usein, useimmat viat ehditään havaitsemaan heti kun ne kasvavat pienintä havaittavaa kokoa suuremmiksi. Tarkastus vaatii kuitenkin kalustoa ja työvoimaa, eikä sitä siten ole mielekäästä tehdä tarvittavaa useammin. Optimaalinen tarkastustiheys on siis kompromissi radan toimivuuden ja turvallisuuden sekä taloudellisuuden välillä. [73]

Zaremskin [73] mukaan Pohjois-Amerikassa ja Euroopassa toimivien rautateiden käyttämät tarkastustiheydet perustuvat seuraavanlaisiin tekijöihin:

- Tarkastustekniikan luotettavuuteen eli siihen, kuinka suurella varmuudella viat havaitaan.
- Hyväksyttävään riskitasoon eli siihen, millainen junan suistumistodennäköisyys sallitaan.
- Vian kasvuun vaikuttaviin tekijöihin eli liikenteen sekä kiskon ja radan ominaisuuksiin.
- Kiskon kuntoon eli aiemmissä tarkastuksissa havaittujen vikojen määrään.

Mitä pienempiä vikoja tarkastustekniikalla voidaan havaita, sitä pidemmän aikaa vika on kooltaan pienimmän havaittavan ja kriittisen koon välillä. Tämän ansiosta tarkastustiheyttä voidaan harventaa.

Hyväksyttävä riskitaso riippuu radalla kulkevan liikenteen tyypistä ja liikennöintinopeudesta. Mikäli radalla kulkee matkustajaliikennettä tai vaarallisten aineiden kuljetuksia, ovat junan suistumisen seuraukset tavallista rahtiliikennettä vakavammat ja hyväksyttävä riskitaso alhaisempi. Samoin korkeampi liikennöintinopeus laskee hyväksyttävää riskitasoa. Täten tarkastustiheydet radoilla, joilla on matkustajaliikennettä tai vaarallisten aineiden kuljetuksia, ovat rahtiliikenteelle tarkoitettuja ratoja tiheämpiä. [73]

Vian kasvuun vaikuttavia tekijöitä ovat muun muassa liikenteen määrä, tyyppi ja nopeus sekä akselikuorma. Mitä enemmän radalla liikennöidään, sitä nopeammin viat kasvavat ja tarkastustiheyttä tulee tihentää.

Kiskon kuntoa kuvataan tavallisesti vikatiheydellä. Mikäli edellisissä tarkastuksissa on havaittu ennalta määriteltyjä raja-arvoja suurempi määrä vikoja, on tarkastustiheyttä tiheennettävä. Vuorostaan mikäli kiskon vikatiheys on tiettyä raja-arvoa alhaisempi, voidaan tarkastustiheyttä harventaa.

Taulukossa 11 on esitetty esimerkkejä tekijöistä, joiden mukaan maailmalla toimivat rautatieyhtiöt muuttavat tarkastustiheyksiään. Taulukosta ilmenee myös kuinka paljon tietyn muuttujan muuttuminen vaikuttaa tarkastustiheyteen.

Taulukko 11 Ultraäänitarkastuksen tarkastustiheyden määrittelyssä huomioon otettavia tekijöitä ja niiden vaikutuksia [73].

Tekijä	Muutos tekijässä	Tarkastustiheyden kasvu
Vuosittainen kuormitus [Mbrt/v]	10 : 1 (esim. 1 Mbrt -> 10 Mbrt)	3,3 – 5 : 1
Suurin sallittu nopeus	16 km/h -> 130 km/h	2,5 : 1
Matkustajaliikennettä	kyllä	2 : 1
Kiskoprofiili	60 kg/m -> 40 kg/m	3,3 : 1
Aiempi vikatiheys	10 : 1	2 – 3,3 : 1

6.3 Kiskojen tarkastus Suomessa

Kiskot tarkastetaan Suomessa kävelytarkastuksen yhteydessä silmämääräisesti sekä erikseen ultraäänitarkastuksella. Rautatieviraston vuonna 2009 antaman määräyksen [76] mukaan kiskojen tarkastukseen ei ole välttämätöntä käyttää nimenomaan ultraäänitarkastusta, mutta korvaavan menetelmän on oltava teknisiltä ominaisuuksiltaan vähintään ultraäänitekniikkaa vastaava.

Koska ratojen kävelytarkastuksessa tarkastajan tehtävänä on kiinnittää huomiota radan kaikkiin komponentteihin, eivät näkyvätkään kiskoviat välttämättä tule kävelytarkastuksessa havaituiksi. Täten kiskovikojen tarkastus on pitkälti ultraäänitarkastajien varassa.

Suomessa kiskojen tarkastusta hoitaa kaksi yritystä, Oy VR-Rata Ab ja Destia - Maansiirto Veli Hyyryläinen Oy, joilla kummallakin on tietyt toiminta-alueet.

Suomessa ultraäänitarkastus tehdään tarkastusjalustaa apuna käyttäen. Tarkastus tehdään yleensä pareittain, jolloin kummallakin kiskolla kulkee yksi tarkastaja. Tarkastusvuoron aikana tarkastajat ehtivät tarkastaa noin 6 – 10 km kiskoa. Tavallisesti tarkastus tehdään päiväsaikaan, mutta mikäli raide on vilkkaasti liikennöity, voidaan tarkastus joutua tekemään yöllä, jolloin liikenne on vähäisempää.

Suomessa ultraäänitarkastus on tehtävä vähintään kerran viidessä vuodessa. Rataosuuksilla, joilla on jatkuvakiskoraiteet, säännöllistä henkilöliikennettä tai suurin sallittu akselipaino 250 kN, ultraäänitarkastus on tehtävä vähintään kerran vuodessa. Mikäli radalla kuljetetaan huomattavasti vaarallisia aineita, on tarkastustiheyttä tihennettävä. Tarkastustiheyttä on tihennettävä mikäli radan vikatiheys on tiettyä radan kunnossapitotasosta ja radalle vuosittain kertyvästä liikennemäärästä riippuvaa raja-arvon ylärajaa suurempi. Vastaavasti tarkastustiheyttä voidaan harventaa mikäli vikatiheys on tiettyä raja-arvon alarajaa alhaisempi. Eri kunnossapitotasoille ja liikennemäärille asetetut raja-arvot on esitetty taulukossa 12. Suomessa ratojen kävelytarkastuksen tiheys riippuu vuorostaan ainoastaan radan kunnossapitotasosta ja on 1 – 3 kertaa vuodessa. [48]

Taulukko 12 Ultraäänitarkastuksen tarkastustiheyden määrittämiseen käytetyt vikatiheyksien raja-arvot kunnossapitoluokille 1AA, 1A, 1, 2 ja 3 [48].

Kunnossapitotaso	Kuormitus [Mbrt/v.]	Vikatiheys [kpl/km]	
		Alaraja	Yläraja
1AA, 1A ja 1	> 8	0,5	1,0
	5 – 8	0,5	1,5
	2 – 5	0,5	2,0
	< 2	0,5	2,5
2	> 8	0,5	1,0
	5 – 8	0,5	1,5
	2 – 5	0,5	2,0
	< 2	1,0	3,0
3	5 – 8	0,5	2,0
	2 – 5	0,5	2,5
	< 2	1,0	3,0

Kun kiskossa havaitaan mahdollinen vika, varmennetaan se käsikäyttöisiä luotaimia apuna käyttäen. Kun vika on varmennettu, tehdään kiskon varteen liidulla merkintä, josta ilmenee vian vikaluokka. Kuvassa 55 on esitetty tällainen merkintä. Lisäksi vika kirjataan tarkastuspöytäkirjaan. Tarkastuspöytäkirjaan kirjataan muun muassa vian sijainti rataverkolla, kohta kiskossa, vian vikaluokka ja UIC:n mukainen vikakoodi sekä toimenpide-ehdotukset. [48]



Kuva 55 Kiskon varteen tehty merkintä ultraäänitarkastuksessa havaitusta vikaluokan 3 viasta.

Suomessa tehdään myös koneellista ultraäänitarkastusta kiskojen tarkastusvaunulla. Oma vaunu Suomessa ei ole, mutta muualta Euroopasta tilataan noin kerran kolmessa vuodessa koko jatkuvaksi hitsatun rataverkon kattava tarkastus. Tähän mennessä tarkastusvaunulla tehtyjen tarkastusten tulokset ovat olleet vaihtelevia. Osana tarkastuskerroista ongelmana on ollut virrehavainnot kohdista, joissa todellista vikaa ei ole ollut.

7 Kiskon kunnossapito

Kiskon kunnossapidon tarkoituksena on ylläpitää kiskojen kunto sellaisella tasolla, että radalla liikennöinti on turvallista ja sujuvaa. Kiskon kunnossapito jakautuu kiskon kulkupinnan kunnossapitoon ja kiskovikojen korjaukseen. Yksi kiskon kulkupinnan kunnossapitomenetelmistä on kiskonhionta. Sen avulla on mahdollista ennaltaehkäistä syntyviä ja poistaa jo syntyneitä vikoja sekä parantaa kiskon profiilia. Kiskon korjauksella voidaan poistaa vakavampia vikoja. Tämän luvun painopiste on kiskonhionnassa, sillä oikein tehtynä sen avulla on mahdollista kasvattaa kiskon käyttöikä, alentaa radan kunnossapitokustannuksia ja parantaa liikkuvan kaluston käyttäytymistä radalla.

7.1 Kiskonhionta

Kiskonhionnalla pyritään pidentämään kiskon käyttöikä hallitsemalla sen kulumista sekä pintavikoja. Ulkomailla kiskonhiontaa on tehty jo yli 60 vuotta. [77] Tämän aikana kiskonhiontaan käytettävä kalusto on kehittynyt merkittävästi. Hionnan lisäksi kiskon kulkupinnan kuntoa voidaan parantaa myös jyrsimällä tai höyläämällä. Niiden käyttö on perusteltua, mikäli kiskon pinnasta tarvitsee poistaa paljon materiaalia, esimerkiksi pahojen pintavikojen poistamiseksi tai voimakkaasti muuttuneen profiilin korjaamiseksi. Kiskojen säännölliseen kunnossapitoon jyrsimä ja höyläys eivät kuitenkaan sovellu, sillä tehokkaan materiaalinpoiston vuoksi toistuva jyrsimä ja höyläys lyhentävät kiskon käyttöikä merkittävästi, eikä niitä siten käsitellä tässä työssä tarkemmin. [78]

7.1.1 Hionnan tavoitteet

Alkujaan kiskonhionnan päätavoitteena oli kiskon pinnan tasaaminen korrugaation poistamiseksi sekä ympärilyöntijälkien ja kiskonpäiden lävistymien poistaminen [77]. Nykyisin kiskonhiontaa tehdään pääasiallisesti neljästä syystä [79]:

- Vierintäväsymisvaurioiden poistamiseksi.
- Korrugaation poistamiseksi.
- Sopivan kiskoprofiilin luomiseksi.
- Uusien kiskojen hiilenkatokerroksen (ks. luku 2.2.6), valssaushilseen ynnä muun valmistuksesta ja asennuksesta seuraavan haitan poistamiseksi.

Hionta pintavaurioiden poistamiseksi

Kiskonhiontaa tehdään maailmalla runsaasti vierintäväsymisväröjen poistamiseksi. Vierintäväsymisestä on tullut merkittävä ongelma viimeisten muutaman vuosikymmenen aikana osalle maailmalla toimivista rautateistä. Syitä lisääntyneisiin vierintäväsymisestä johtuviin vikoihin ovat muun muassa kasvaneet akselipainot ja nopeudet, vähentynyt kiskon kuluminen kovempien teräslaatuojen myötä sekä suuret sivuttaisvoimat, joita suurnopeusjunat voivat aiheuttaa. Vierintäväsymisen johtaa mikrokoopipisten väröjen syntymiseen, jotka kasvavat aluksi hitaasti, mutta värön pituuden kasvaessa kasvu kiihtyy. [43] Kiskonhionnalla kiskon pinnasta poistetaan ohut kerros materiaalia, jonka mukana syntyneet väröt poistuvat [63].

Korrugaatio on kiskon kulkupinnassa esiintyvää jaksollista aaltoisuutta. Se lisää liikenteen aiheuttamaa melua sekä kasvattaa kiskoon kohdistuvia dynaamisia voimia, joista voi aiheutua sekä liikkuvalla kalustolle että radalle vahinkoa. [54]

Korrugaatio tulisi hioa pois ennen kuin sen syvyys ylittää 0,05 mm. Yli 0,1 mm korrugaatio heikentää radan kuntoa löystyttämällä kiskon kiinnityksiä ja heikentämällä radan geometriaa. Kun korrugaatio poistetaan hiomalla, on hionta tehtävä 0,1 mm syvemmältä, kuin syvin korrugaatio on. [9] Mikäli korrugaatiosta poistettaisiin ainoastaan aaltojen harjat, jäisivät aaltojen pohjat täysin koskematta ja siten niiden kovuus poikkeaisi hiottujen harjojen kovuudesta. Tällöin korrugaatio uusiutuisi nopeasti.

Vierintäväsymissärojien ja korrugaation lisäksi hionnalla on mahdollista poistaa muitakin matalia kiskon pinnan epäjatkuvuuskohtia, kuten purseita ja ympärilyöntijälkiä [79]. Jos viat ovat yksittäisiä, hionta voidaan tehdä käsikäyttöisellä hiontalaitteella.

Profiilihionta

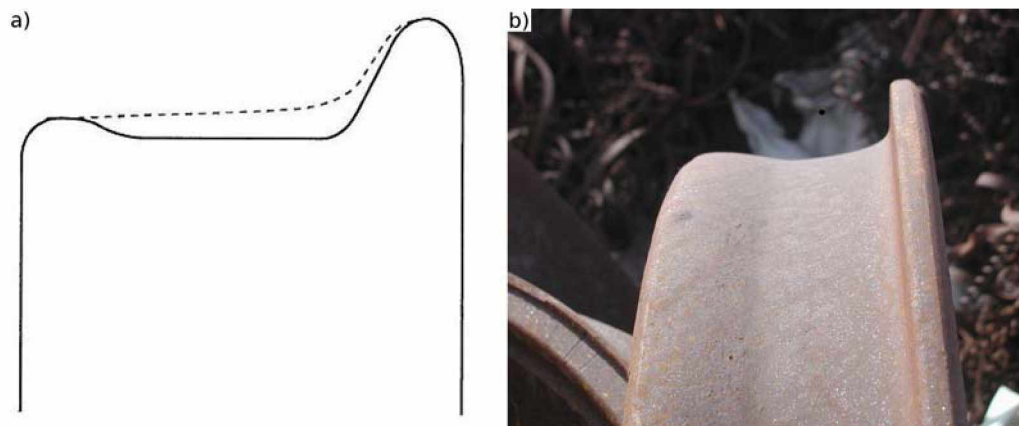
Kiskon pinnassa esiintyvien vikojen poistamisen lisäksi kiskonhionnalla muutetaan kiskon profiilia. Profiilin muuttamisella pyritään optimoimaan pyörä-kisko-kontakti siten, että kiskon kulumisen ja/tai väsymisen on mahdollisimman vähäistä. Magelin et al. [80] mukaan optimaalisin kiskoprofiili vastaa sen päällä kulkevan pyörän profiilia. Tällöin pyörän kuorma jakautuu tasaisesti kiskon pinnalle ja kosketusjännitys vähenee. Pyörän ja kiskon välisen kontaktin ei kuitenkaan tule olla liian leveä, sillä tällöin kontaktialueen reunalla tapahtuu liiallista liukumista. [80] Kunkin rataosuuden optimaalisin kiskoprofiili riippuu muun muassa liikennöintinopeuksista, radan geometriasta, liikkuvan kaluston ominaisuuksista sekä kaluston pyörien profiileista. Myös raiteissa käytetty kiskolaatu on otettava profiilin suunnittelussa huomioon. [81]

Suorilla rataosuuksilla ja kaarteissa on kannattavaa käyttää toisistaan poikkeavia profiileja. Suorille rataosille hiottavan profiilin keskikohtaa voidaan tarkoituksellisesti siirtää kohti kiskon sisä- tai ulkoreunaa. Pyörän ja kiskon kontakti siirtyy profiilin keskikohdan mukana, jonka seurauksena vaihtuva kontaktikohta johtaa pyörän tasaisempaan kulumiseen, siten vähentäen valelaipallisten pyörien syntymistä. [81]

Junien kaarrekäyttötymisen parantamiseksi ja kiskoon kohdistuvien voimien pienentämiseksi ulko- ja sisäkiskot voidaan hioa tiettyihin toisistaan poikkeaviin profiileihin. Kiskojen hiontaa, jossa ulko- ja sisäkisko hiotaan eri profiileihin, kutsutaan epäsymmetriahionnaksi. Epäsymmetriahionnassa hiotaan tavallisesti ulkokiskon kulkureunan pyörästystä ja sisäkiskon ulkoreunan puoleista aluetta normaalia enemmän, jolloin kontaktikohtia saadaan siirrettyä ja laajennettua ja jännityksiä pienennettyä. Epäsymmetrisillä profiileilla on mahdollista tuottaa suurempi vierintäsäde-ero pyöräkerän pyörien välille, jolloin liikkuvan kaluston kaarrekäyttötyminen paranee.

Mikäli rataosuudella kulkevien junien pyörät ovat kuluneita, voi pyörään kulumisen seurauksena muodostunut valelaippa (false flange) (Kuva 56) olla kontaktissa kiskoon ja kohdistaa siihen suuren pintapaineen. Valelaipan kontaktia ilmenee etenkin pienisäteisten, levennetyn raideleveyden kaarteiden sisäkiskoissa [56]. Stanfordin et al. [56] mukaan yli 12 mm kasvu raideleveydessä altistaa sisäkiskon valelaipan kontaktille ja sen aiheuttamalle väsymiselle. Oletusarvoisesti ongelma ratkaistaan poistamalla valelaipalliset pyörät liikenteestä. Mikäli tähän ei kuitenkaan ole mahdollisuuksia, voidaan osuuksilla joilla valelaipan kontaktia ilmenee, kiskon ulkoreuna hioa

normaalia matalammaksi, jolloin kontaktikohta laajenee ja siirtyy keskeemmälle kisko-ko, ja haitallisen suurelta pintapaineelta välttyään [80].



Kuva 56 a) Kaavakuva valelaipasta pyörässä [mukailtu [78]]. b) Valelaipallisen pyörän kulkupinta.

Uusien kiskojen hionta

Myös uusia, vasta rataan asennettuja kiskoja hiotaan. Tällaista ennakoivaa hiontaa tehdään kiskojen kulkupinnan tasaisuuden parantamiseksi, halutun profiilin saavuttamiseksi sekä hiilenkatokerroksen ja mahdollisen valssaushilseen poistamiseksi [79]. Ennakoiva hionta on kiskonhionnan teknisten toimitusehtojen [53] mukaan tehtävä vuoden sisällä kiskojen asennuksesta tai ennen kuin liikennemäärä ylittää 5 Mbrt. Vasta-asennettujen kiskojen kulkupinnan tasaisuutta heikentäviä tekijöitä ovat rullaoikaisussa syntyneet pitkät aallot sekä geometrialtaan huonot hitsit [17, 79]. Tällaiset epätasaisuudet aiheuttavat dynaamisia kuormia ja siten nopeutunutta korruugaation muodostumista. Käytännössä kuitenkin rullaoikaisussa syntyneiden aaltojen poistaminen ei ole kannattavaa, sillä niiden poistamiseksi materiaalia tarvitsee poistaa huomattava määrä niiden pitkän aallonpituuden vuoksi. [17]. Uusien kiskojen profiili voidaan hioa vastaamaan paremmin rataosuudella liikennöivän kaluston pyörien profiilia parempien kulkuominaisuuksien sekä kiskon vähäisemmän kulumisen ja väsymisen takaamiseksi [80].

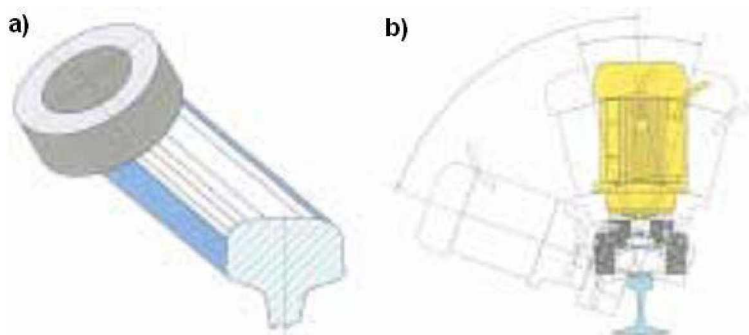
Ennakoivalla kiskonhionnalla pyritään tasaisuuden ja profiilin parantamisen lisäksi poistamaan valmistuksessa kiskonpintaan muodostuneita haitallisia kerroksia: valssaushilsettä ja hiilenkatokerrosta. Valssauksessa kiskonpintaan muodostuu valssaushilsettä, jota poistetaan jo valmistusvaiheiden väleissä hyvän pinnanlaadun takaamiseksi. Käyttöön otetussa kiskossa valssaushilse voi edistää korroosiota sekä toimia abrasiivina kiskon ja pyörän välissä [82].

Uusien kiskojen pinnassa on ohut, alle 0,5 mm hiilenkatokerros. Hiilenkatokerros on kiskon valmistuksen yhteydessä kiskon pinnalle muodostuva hiilestä köyhä kerros, joka sisältämänsä ferriitin vuoksi on perliittistä perusmateriaalia pehmeämpää [83]. Säröt ydintyvät ja kasvavat hiilenkatokerroksessa nopeammin kuin perliitissä, jonka vuoksi hiilenkatokerroksen poishiominen on ollut suositeltavaa. Carrollin ja Beynonin [83] tekemien testien mukaan hiilenkatokerroksella ei kuitenkaan ole oleellista käytännön merkitystä kiskon käyttöikänsä, sillä säröjen ydintyminen hiilenkatokerrokseen tapahtuu vain vähän perusainetta nopeammin ja särönkasvu hidastuu heti särön edettyä kovempaan perusaineeseen.

7.1.2 Hionnan suoritus

Laajamittainen kiskojen hionta tehdään kiskoilla liikkuvia hiontajunia käyttäen. Nykyaikaisissa hiontajunissa hiontakivet ovat tavallisesti pyöriviä ja niiden asentoa kiskon hamaran suhteen voidaan muuttaa. Kuvassa 57 on esitetty pyörivän hiontakiven asento kiskoon nähden sekä kiven asennon muuttuminen hiontamoottoria kääntämällä. Hiominen perustuu hiontakivien aiheuttamaan kiskon pinnan abrasiiviseen kulumiseen. Hionnassa poistetun materiaalin määrä riippuu muun muassa seuraavista tekijöistä [63]:

- Hiontakivien määrä ja asento.
- Hiontamoottorien teho.
- Hiontakivien ominaisuudet, kuten materiaali ja karkeus, sekä kunto.
- Voima, jolla kiviä painetaan kiskoa vasten.
- Hiontakoneen nopeus.
- Hiottavan kiskon kovuus.



Kuva 57 a) Hiontakiven asento suhteessa kiskoon. b) Kiven asennon muuttaminen hiontamoottoria kääntämällä. [17]

Kiskoon tuotetaan haluttu profiili asettamalla peräkkäiset hiontakivet eri kulmiin siten, että lopputuloksena syntyy halutun profiilin muotoinen, viisteistä koostuva kulmikas profiili (Kuva 58). Kulmikkaus häviää kiskon plastisen muokkautumisen seurauksena tavallisesti jo muutaman junan ylityksen jälkeen. Mikäli profiili on yhä kulmikas muutaman päivän liikenteen jälkeen, ovat kiskoon hiotut viisteet ja niiden väliset kulmat liian suuria kiskon kovuuteen ja sillä liikennöivän kaluston akselikuormiin nähden. [78] Kiskonhionnan tekniset toimitusehdot [53] määrittelevät EN13231-3 [84] standardiin pohjautuen suurimmiksi viisteiden leveyksiksi 4 mm kulkureunassa, 7 mm kulkupinnan reunalla ja 10 mm kulkupinnan keskellä. Lisäksi hiotun pinnan on oltava karheudeltaan $R_a < 13 \mu\text{m}$ [53]. Hiotun pinnan karheuteen vaikuttavat hiontakivien karkeus, hiontamoottorien hallintajärjestelmä sekä hiontamoottorien vakaus [63]. Kiskonhionnan tekniset toimitusehdot [53] sallivat EN13231-3 standardia [84] karheamman pinnan. Standardi suosittelee suurimmaksi sallituksi R_a arvoksi 10 μm .



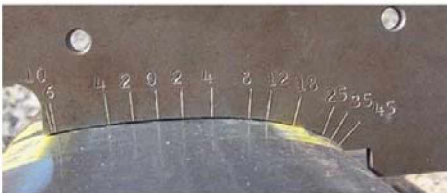
Kuva 58 Hiontaviisteet vastahiotussa kiskossa [17].

Etenkin, mikäli hiontaa ei ole aiemmin tehty, on hiottavan kiskon profiili mitattava ennen hiontaa tavoiteprofiilin saavuttamiseksi. Vertaamalla mitattua ja tavoiteprofiilia keskenään hiontatarve hamaran eri kohdissa saadaan määritetyksi. Kun tiedetään kuinka paljon miltäkin kohdalta hamaraa materiaalia on poistettava, voidaan hiontaparametrit, kuten hiontakivien kulmat ja voimat määrittää sellaisiksi, että tavoiteprofiili saavutetaan. Mikäli hiontaa tehdään pintavaurioiden poistamiseksi, on niiden syvyys selvitettävä ennen hiontaa.

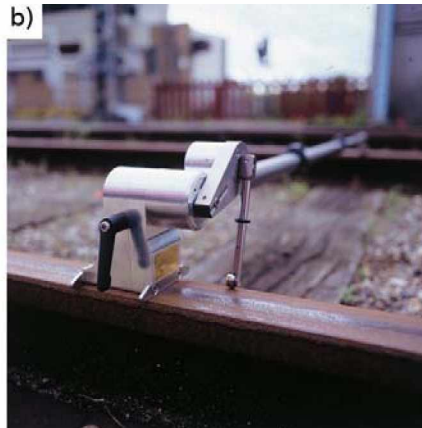
Kiskon profiili on tarpeen mitata myös hionnan jälkeen, jotta voidaan varmistua tavoiteprofiilin saavuttamisesta. Mikäli hionnalla pyrittiin poistamaan pintavaurioita, on pinta tutkittava pintavaurioiden poistumisen varmistamiseksi.

Kiskon profiili on mahdollista mitata käsin kiskotulkin (bar gauge) tai MiniProf-mittalaitteen (Kuva 59) avulla. Kiskotulkin avulla kokenut käyttäjä voi arvioida kiskon profiilia silmämääräisesti. Koska kiskotulkin avulla saadut tulokset perustuvat silmämääräiseen arviointiin, ovat ne subjektiivisia. MiniProf-mittalaitteella kiskon profiilista saadaan puolestaan objektiivista mittaustietoa. Nykyaikaisissa hiontavaunuissa on kivien etu- ja takapuolella laser-pohjaiset mittalaitteet kiskon profiilin määrittämiseksi. Laser-pohjaisten mittalaitteiden mittatarkkuus on MiniProf-mittalaitetta heikompi, mutta kuitenkin riittävä hiontatyön tarpeisiin. [78]

a)



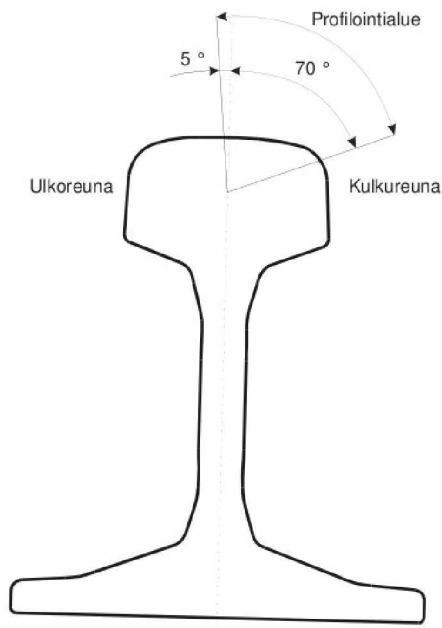
b)



Kuva 59 a) Kiskotulkki kiskon päällä. b) MiniProf-mittalaite [85].

Kiskon on hionnan jälkeen vastattava referenssiprofiilia tiettyjen toleranssien tarkkuudella. Suomessa toleranssit ovat hamaran profiilintialueella (Kuva 60) $\pm 0,3$ mm,

mikäli suurin sallittu nopeus on yli 140 km/h ja $\pm 0,5$ mm, mikäli suurin sallittu nopeus on 140 km/h tai alle. [53]



Kuva 60 Kiskon hamaran profilointialue [53].

Toleranssien lisäksi kiskonhionnan teknisissä toimitusehdoissa [53] ja standardissa EN13231-3 [84] on määritetty raja-arvot sille, kuinka suuren osan hiotun profiilin mittauksista on oltava toleranssien sisällä. Kiskonhionnan teknisissä toimitusehdoissa määritetään, että enintään 20 % mittaustuloksista saa olla toleranssin ulkopuolella. Kuitenkin, mikäli toleranssi on $\pm 0,3$ mm, yksikään mittaustulos ei saa ylittää $\pm 0,5$ mm. Standardissa EN13231-3 [84] on määritetty eri luokkia sille, kuinka suuren osan mittauksista on oltava toleranssien sisällä. Standardin mukaan eri luokkia voidaan käyttää sen mukaan, kuinka kriittinen lopullisen profiilin oikeellisuus on. Esimerkiksi mikäli hiontatyö tehdään pelkästään korrugaation poistamiseksi, voi vaatimus olla vapaampi. Suomessa käytössä oleva 20 %:n sallittu poikkeama vastaa melko läheisesti standardin EN13231-3 [84] luokkaa R. Grassien [78] mukaan luokka R on soveltuvin vaihtoehto säännöllisesti hiotulle rataosuudelle, jolla liikennöi sekä tavara- että henkilöliikennettä. Taulukossa 13 on esitetty standardissa EN13231-3 olevat kolme eri luokkaa vaatimuksille mittaustulosten pysymisestä toleranssien sisällä.

Taulukko 13 Mittaustulosten vähimmäisosuus, joiden on oltava määritellyn toleranssin sisällä [84]

Toleranssin laajuus	0,6 mm	1,0 mm	1,7 mm
Luokka Q	90 %	95 %	98 %
Luokka R	75 %	85 %	98 %
Luokka S	Ei vaadita	Ei vaadita	75 %

7.1.3 Hiontastrategiat

Kiskon kunnossapitohiontaa voidaan tehdä joko ennaltaehkäisevästi tai korjaavasti. Korjaavaa hiontaa tehdään kiskoissa olevien geometrinen virheiden tai pintavikojen poistamiseksi, kun kiskon kunnon havaitaan laskeneen tiettyjä raja-arvoja heikomaksi. Kriteereinä voivat olla esimerkiksi tietyn aallonpituuden omaavan korrugaation syvyys, liiallinen melu tai kiskon pinnalla esiintyvien vierintäväsytymisjärjestelmien pituus. Koska korjaavalla hionnalla poistetaan vikoja, jotka ovat päässeet kasvamaan pitkälle, joudutaan korjaavassa hionnassa poistamaan huomattava määrä materiaalia kiskon pinnasta. Jotta riittävä määrä metallia saadaan poistetuksi, on hiontavaunulla tehtävä monia hiontaylityksiä. [78]

Ennaltaehkäisevällä hionnalla pyritään vuorostaan puuttumaan kiskossa ilmeneviin ongelmiin ennen kuin ne ehtivät huomattavasti kasvamaan. Sroban et al. [81] mukaan Pohjois-Amerikassa toimivilla rautateillä tehdään ennaltaehkäisevää kiskonhiontaa seuraavanlaisten etujen saavuttamiseksi:

- Kiskon kulumisen vähentäminen.
- Kiskon pinnalla ja pinnan alla esiintyvän väsymisen hallitseminen.
- Kiskon profiilin hallitseminen liikkuvan kaluston paremman ohjautuvuuden saavuttamiseksi.
- Liikkuvan kaluston ajovakauden paraneminen.
- Liikkuvan kaluston pyörien käyttöiän piteneminen.

Ennaltaehkäisevää kiskonhiontaa tehdään tietyn ennalta määrätyn intervallin. Intervallin on oltava tarpeeksi lyhyt, jotta kiskossa ilmenevät ongelmat, kuten korrugaatio tai vierintäväsytymisen, pysyvät halutun tason alapuolella. Liian lyhyestä intervallista kuitenkin seuraa tarpeettoman suuret kunnossapitokustannukset ja lyhentynyt kiskon käyttöikä. Hiontaintervalli tulee siten määrittää ja sen toimivuutta seurata tekemällä mittauksia tietyissä kontrollikohteissa [63]. Taulukossa 14 on esitetty eräiden Pohjois-Amerikassa ja Australiassa toimivien rautatieyritysten vuonna 2002 käyttämät hiontaintervallit.

Taulukko 14 Eräiden Pohjois-Amerikassa ja Australiassa toimivien rautatieyritysten vuonna 2002 käyttämät hiontaintervallit 260 – 320 BHN kovuuksisille kiskoille [63].

Hiontakohde	Rahtiliikenne	Matkustajaliikenne
Uusi kisko	10 Mbrt	10 Mbrt
Kaarre, alle 2000 m	8 – 12 Mbrt	5 – 7 Mbrt
Kaarre, yli 2000 m	16 – 24 Mbrt	10 – 15 Mbrt
Suora	40 – 60 Mbrt	20 – 30 Mbrt

Koska ennaltaehkäisevää hiontaa tehdään suhteellisen usein, on sen avulla mahdollista säilyttää kiskoprofiili lähellä haluttua optimaalista profiilia. Tämän ansiosta liikkuvan kaluston ajovakaus ja kaarrekäyttäytyminen paranevat. [81] Parempi kaarrekäyttäytyminen pienentää kiskoon kohdistuvia voimia, jonka ansiosta kiskon vaurioituminen on hitaampaa.

Koska ennaltaehkäisevässä hionnassa puututaan vikoihin ennen kuin ne pääsevät etenemään liian pitkälle, voidaan hionta tehdä poistamalla vain vähäinen määrä ma-

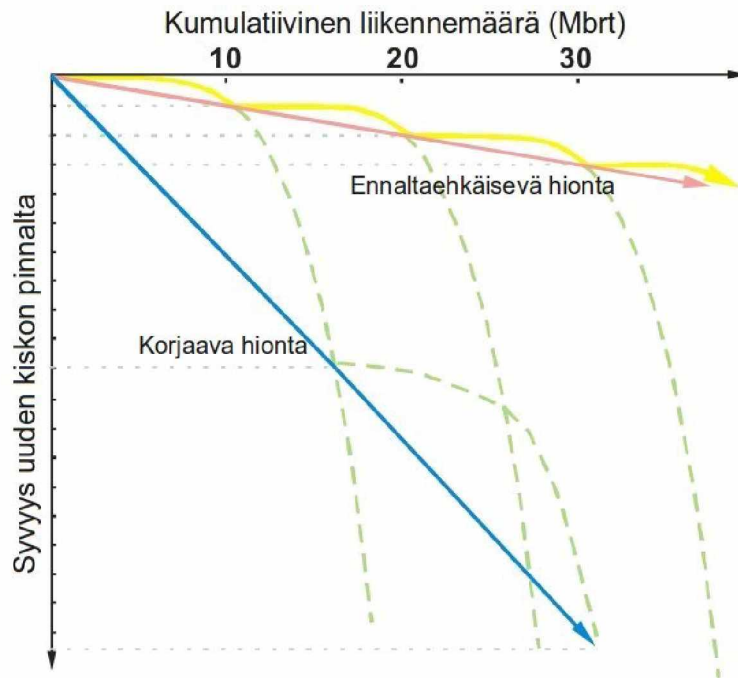
teriaalia, tavallisesti noin 0,2 mm. Ennaltaehkäisevässä hionnassa poistettavaan optimaaliseen materiaalimäärään vaikuttavat muun muassa seuraavanlaiset tekijät [81]:

- Edellisen hionnan jälkeen kertynyt liikennemäärä.
- Radalla liikennöivän kaluston akselikuorma.
- Liikenteen tyyppi (rahti-/matkustajaliikennettä).
- Kiskon ominaisuudet.
- Radan geometria.
- Ympäristö ja vuodenaajat.
- Kiskon voitelu.

Ennaltaehkäisevässä hionnassa poistettavan vähäisen materiaalimäärän ansiosta kiskon pinnalle liikenteen seurauksena muodostunut muokkauslujittunut kerros säilyy lähes koskemattomana. Muokkauslujittunut kerros on perusmateriaalia kovempaa ja kestää siten muokkautumatonta materiaalia paremmin kulutusta.

Vaikka ennaltaehkäisevää hiontaa tehdään useammin kuin korjaavaa, materiaalia poistetaan kokonaisuudessaan vähemmän. Ero perustuu kiskoissa olevien vikojen kasvun nopeutumiseen ajan myötä. Etenkin vierintäväsymissäröjen kasvunopeus kiihtyy niiden pituuden mukana. Grassien [78] mukaan myös korrugaation syvyys kehittyy eksponentiaalisesti liikennemäärän mukana. Kuvassa 61 on havainnollistettu tietyn liikennemäärän jälkeen vaadittavaa hiontasyvyyttä kasvaneiden vierintäväsymissäröjen poistamiseksi.

Mikäli hiontavaunu on varustettu riittävällä määrällä hiontakiviä (yli 20 kiveä kisko kohti [81]), joiden kulmaa on mahdollista muuttaa, voidaan yhdellä ylityksellä poistaa tarvittava määrä materiaalia ja hioa kisko haluttuun profiiliin siten, että yksittäiset viisteet pysyvät riittävän pieninä. Grassien [78] mukaan 48-kivisellä hiontavaunulla on mahdollista hioa kertaylityksellä yli 10 km kisko tunnissa. Vertailuna, useita ylityksiä vaativassa korjaavassa hionnassa hiotun kiskon määrä on yleensä noin 1 km/h. Paikoissa, joissa kiskon kunto on päässyt ennaltaehkäisevästä hiontastrategiasta huolimatta laskemaan odotettua heikommalle tasolle, voidaan joutua poistamaan ennalta suunniteltua enemmän materiaalia ja siten tekemään useampia hiontaylityksiä.



Kuva 61 Kiskoon kasvaneiden vierintäväsymissäröjen poistamiseksi vaadittavat hiontasyvytydet ennaltaehkäisevällä ja korjaavalla hiontastrategialla. Kaarevat viivat kuvaavat säröjen kasvua. [69]

Jotta ennaltaehkäisevää hiontastrategiaa voidaan käyttää, on hiottavan kiskon oltava niin hyvässä kunnossa, että sen kunnostaminen onnistuu kertaylityksellä. Siten rataosalla, jolla ei ole aiemmin tehty ennaltaehkäisevää hiontaa, kiskot on saatettava riittävän hyvään kuntoon ennen ennaltaehkäisevän hiontastrategian käyttöönottoa. Kunnostus on mahdollista tehdä kerralla korjaavalla hiontastrategialla. Tämä on kuitenkin kallista ja kuluttaa kiskoa tarpeettomasti. Taloudellisempi ja kiskon käyttöiän kannalta edullisempi lähestymistapa on vähittäinen ennaltaehkäisevään hiontaan siirtyminen, jossa hionta tehdään varsinaisen ennaltaehkäisevän hionnan tavoin kertaylityksenä, mutta poistettava metallimäärä on suurempi. Suurempaan hiontasyvyyteen päästään esimerkiksi tehokkaammalla hiontajunalla tai hitaammalla hiontanopeudella. Sroban et al. [81] mukaan tavoiteltuun hiontaprofiiliin päästään yleisesti yhdestä kolmeen hiontakerran aikana. Suurnopeusradoilla vierintäväsymissäristä päästään tavallisesti täysin eroon kolmen hiontakerran aikana. Kun tavoiteltu kisko-profiili on saavutettu ja säröt on saatu poistettua kiskon pinnalta, siirrytään tavallisen ennaltaehkäisevän hionnan mukaiseen hiontasyvyyteen.

Suurin osa Pohjois-Amerikassa ja Australiassa toimivista rautatieyhtiöistä tekee ennaltaehkäisevää kiskonhiontaa. Käytössä heillä on suuria hiontavaunuja, joissa kuskakin on 84 – 96 hiontakiveä varustettuna 30 hevosvoiman moottoreilla. Näillä laitteilla keskimääräinen hiontanopeus on noin 10 kilometriä tunnissa. Risteysten ja vaihteiden sekä muiden erikoisratarakenteiden hiontaan suuret hiontakoneet eivät sovellu. Niiden hiontaan kyseisillä rautatieyhtiöillä on käytössä pienempiä, 16 – 24 kivisiä hiontakoneita. Hionnan lisäksi rautatieyhtiöt käyttävät kiskonvoitelua hallitakseen pyörän ja kiskon välistä kitkaa. Tällä tavoin pyörän ja kiskon kuluminen ja väsyminen ovat vähäisempiä ja hiontaintervallien on mahdollista olla pidempiä. [81]

Tietylle rataosuudelle sopivimman hiontastrategian valinta riippuu muutamista tekijöistä. Ensinnäkin, ennaltaehkäisevän hionnan käyttö on mielekkäintä, kun sillä voidaan ylläpitää haluttua optimaalista kiskoprofiilia. Toisin sanoen tämä edellyttää optimaalisen kiskoprofiilin määrittämistä. Toiseksi, paikalliset olosuhteet vaikuttavat vikojen kasvunopeuteen. Mikäli vikojen kasvu kiihtyy voimakkaasti niiden koon mukana, on ennaltaehkäisevä hionta mielekästä. Mikäli kasvunopeus pysyy kuitenkin lähellä vakiota, ei ennaltaehkäisevällä hionnalla saavuteta korjaavaan nähden materiaalisäästöä. Vikojen kasvunopeuden pysyessä vakiona ennaltaehkäisevällä hionnalla kyetään kuitenkin säilyttämään muokkauslujittunut kerros korjaavaa hiontaa paremmin.

7.1.4 Hiontakalusto

Kiskonhiontaa voidaan tehdä käsikäyttöisillä laikkaleikkureilla, käsin työnnettävillä hiontakärjillä ja moottorivetoisella hiontakalustolla. Moottorivetoinen hiontakalusto jakautuu kahteen luokkaan: kiskoilla ja maantiellä kulkeviin Hi-rail-ajoneuvoihin sekä pelkästään kiskoilla kulkeviin hiontavaunuihin.

Käsikäyttöisiä hiontakärjiä käytetään yksittäisten virheiden, kuten hitsien muotovirheiden poistoon sekä vaihteiden ja risteysten hiontaan. Moottorivetoisesta hiontakalustosta Hi-rail-ajoneuvot ovat hiontakapasiteetiltaan hiontavaunuja vaatimattomampia, mutta koska niillä voi ajaa niin maantiellä kuin raiteilla, ne eivät varaa rataa kuin hiomiseen tarvittavan ajan. Hiontavaunut ovat tehokkaimpia ja sopivat laajamittaiseen kiskonhiomiseen.

Kiskonhiontavaunussa on nykyisin yleisimmin pyörivät hiontakivet. Myös pitkittäisessä suunnassa liikkuvia hiomakiviä on käytössä. Pyöriviä hiontakiviä käyttävien hiontavaunujen teho riippuu hiontakivien määrästä sekä kiviä pyörittävien moottorien tehosta. Nykyaikaisissa hiontavaunuissa hiontakivien määrä vaihtelee 8 ja 120 välillä vaunun koosta riippuen. Hiontamoottorien tehot ovat tavallisesti 20 – 30 hv (15 – 22 kW). Hiontavaunun käyttötarkoituksesta riippuen se voi olla varustettu joko linjaraitteen tai vaihteiden ja risteysten hiontaan tarkoitetuilla hiontakivillä ja -moottoreilla. Myös näiden yhdistelmät ovat mahdollisia, esimerkkinä Spenon yleishiontavaunu RR16, jossa on 12 kiskon kulkupinnan ja -reunan hiontaan tarkoitettua hiontakiveä sekä 4 vaihteiden hiontaan tarkoitettua hiontakiveä [79].

7.1.5 Kiskonhionta Suomessa

Nummelinin ja Ojanperän [86] mukaan kiskonhionta on aloitettu Suomessa jo 1970-luvulla. Hiontaa kokeiltiin tuolloin kerran vuosikymmenen alussa Spenon hiontakoneella ja jatkettiin useampaan otteeseen 1970- ja 1980-lukujen vaihteessa venäläisellä hiontakoneella. Näiden jälkeen hiontaa tehtiin seuraavan kerran vuonna 1991 noin 44 km verran. Tuohon aikaan korrugaation poistamista junaliikenteen aiheuttaman melun vähentämiseksi pidettiin tärkeimpänä kiskonhionnan syynä.

Vuodesta 1996 alkaen kiskonhiontaa on tehty lähes vuosittain [28]. Tällä hetkellä Suomessa hiotaan kiskoja noin 300 – 400 km vuodessa. Hionta tehdään nykyisin korjaavana hiontana, jonka vuoksi kullakin hiottavalla kohdalla tehdään 5 – 6 hiontaylitystä [61].

Vuonna 2001 julkaistun kiskonhionnan teknisten toimitusehtojen [53] mukaan hiontaa tehdään pääasiallisesti kiskon kulkupinnan tasaisuuden sekä profiilin korjaami-

seksi. Toimitusehdoissa mainitaan lisäksi uusien kiskojen ennakoiva hionta sekä epäsymmetriahionta. Viitalan [61] mukaan epäsymmetriahiontaa ei nykyisin kuitenkaan tehdä, sillä kaarresäteeltään erilaiset kaarteet vaativat omat profiilinsa, eikä näitä ole toistaiseksi määritetty. Kiskonhionnan teknisissä toimitusehdoissa [53] määritellyt hiontaprofiilit vastaavat uusien kiskojen profiileja. Profiili, johon kiskot hiotaan, määrytyy kiskopainon ja suurimman sallitun nopeuden perusteella taulukon 15 mukaan.

Taulukko 15 Hiontaprofiilit Suomessa [53].

Kiskopaino [kg/m]	Suurin sallittu nopeus [km/h]	Hiontaprofiili
60	≤ 160	60 E 1
60	> 160	60 E 2
54	–	54 E 1

7.2 Kiskon korjaus

Tässä luvussa esitetään menetelmiä, joilla erityyppisiä vikoja voidaan korjata. Ensin käsitellään Suomessa käytössä olevia korjausmenetelmiä, jonka jälkeen kerrotaan maailmalla käytössä ja kehitteillä olevista menetelmistä.

7.2.1 Suomessa käytössä olevat korjausmenetelmät

Kiskoissa olevia yksittäisiä vikoja korjataan pääasiassa kolmella tavalla vian tyypistä ja laajuudesta riippuen. Korjaustapoja ovat:

- Päällehitsaus
- Jatkohitsaus
- Sovituskiskon asennus

Päällehitsaus

Päällehitsauksella voidaan korjata kiskon hamaran pintavikoja tai kulumista. Päällehitsaus tehdään puikkohitsaamalla. Päällehitsaus tehdään seuraavasti [38]:

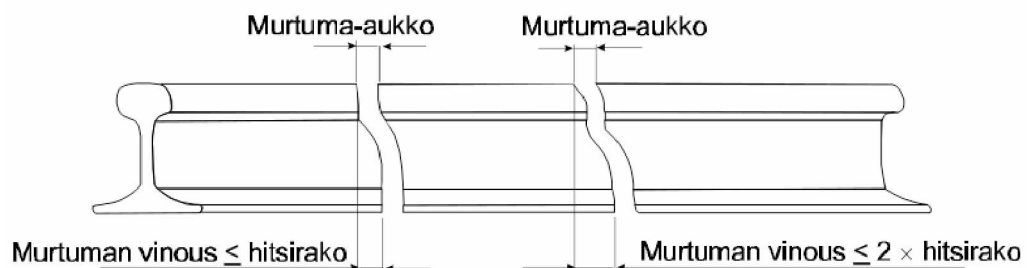
1. Päällehitsattava kiskon osa lämmitetään työlämpötilaan.
2. Työlämpötilassa olevasta kiskosta poistetaan vioittunut perusmateriaali esimerkiksi happitalttaamalla tai polttoleikkaamalla.
3. Kun vioittunut perusmateriaali on poistettu, valmistellaan hitsauspohja hiomalla.
4. Työlämpötilassa olevan hitsauspohjan päälle rakennetaan kiskon hamara puikkohitsaamalla.
5. Hitsauksen päätyttyä kiskon kulkupinta- ja reuna kuumahiotaan lähes kiskon profiilin tasoon. Kun hitsauskohdat ovat jäähtyneet, tehdään viimeistelyhionta.

Päällehitsausta saa tehdä korkeintaan puolen hamaran syvyyteen. Tätä syvempien poikittaishalkeamien korjaus on tehtävä jatkohitsausmenetelmällä, kuten termiitti-hitsauksella. [7]

Jatkoshitsaus

Termiittijatkoshitsaamalla on mahdollista korjata murtumat, joiden vinous ei ylitä kahden termiittihitsin hitsausraon leveyttä eli noin 50 mm. Murtuma voidaan korjata yhdellä termiittihitsillä, mikäli sen vinous on alle yhden termiittihitsin leveys eli noin 25 mm.

Murtuman vinoutta on havainnollistettu kuvassa 62. Murtuma korjataan tasaamalla murtuneet kiskonpääät laikkaleikkaamalla ja venyttämällä kiskoä siten, että kiskonpääät ovat 25 mm päässä toisistaan. Venytys voidaan tehdä kiskoä lämmittämällä tai hydraulisesti venyttämällä. Venytyksen ajaksi kiskonkiinnitykset on irrotettava murtuman molemmin puolin 75 metrin matkalta. Kiskonpääät hitsataan yhteen termiittihitsillä. [34]



Kuva 62 Murtuman vinouden määrittäminen [34].

Mikäli murtuman vinous on yli 25 mm, yksi termiittihitsi ei riitä kattamaan murtumaa. Edellyttäen, että murtuma ei ulotu kiskon pituussuunnassa yli 50 mm matkalle, korjaus voidaan tehdä kahdella termiittihitsillä. Tällöin murtuma tasataan laikkaleikkaamalla siten, ettei poistettava materiaalmäärä ylitä 50 mm. Tämän jälkeen kisko katkaistaan sopivalta etäisyydeltä, jonka ansiosta 50 mm rako voidaan jakaa kahdeksi 25 mm hitsausraoksi. Vähimmäisetäisyys, joka kahden jatkoshitsin välillä on oltava, riippuu suurimmasta sallitusta nopeudesta. Pääraiteilla, joilla suurin sallittu nopeus on yli 160 km/h, vähimmäisetäisyys on 10 m. Mikäli suurin sallittu nopeus on 160 km/h tai alle, vähimmäisetäisyys on 8 m. Katkaistu kiskon osuus hitsataan takaisin kiskoon. Hitsin jäädyttyä jäljellä oleva rako hitsataan kiinni samalla tavoin, kuin yhdellä termiittihitsillä tehtävässä korjaushitsauksessa. [34]

Sovituskiskon asennus

Jos murtuma on vinoudeltaan yli 50 mm, korjausta ei voida tehdä kahdellakaan termiittihitsillä. Tällöin korjaukseen on käytettävä sovituskiskoä. Sovituskiskon asennuksessa murtunut kisko katkaistaan murtuman viereisen pölkkyvälin kohdalta ja asennettavan sovituskiskon etäisyydeltä. Sovituskiskon vähimmäispituus pääraiteissa vastaa edellä esitettyjä kahden hitsin vähimmäisetäisyyksiä. Sovituskisko hitsataan kiinni kiskoon ensin toisesta päästä. Kun hitsi on jäähtynyt, kiskoä venytetään siten, että jäljellä oleva hitsausrao on 25 mm. Venytyksen ajaksi kiskonkiinnitykset on irrotettava 75 metrin matkalta murtuman molemmilta puolilta. Jäljellä oleva rako hitsataan jatkoshitsaamalla. [34]

Muut korjausmenetelmät

Murtumien ohella kiskoissa olevia paikallisia taipumia voidaan korjata. Näiden oikaisemiseksi käytetään liekki-, myöstö- tai mekaanista oikaisua. Käytettävä oikaisutekniikka riippuu taipuman ominaisuuksista, kuten laajuudesta ja jyrkkyydestä. [7]

Mikäli kiskossa on kuluneisuutta, on sen kääntäminen tietyissä tapauksissa mahdollista. Tällöin kulumattomasta ulkoreunasta tulee uusi kulkureuna. Kääntämistä on käytetty esimerkiksi kaarteissa, joissa ulko- ja sisäkisko on vaihdettu keskenään.

7.2.2 Vaihtoehtoiset korjausmenetelmät

Suomessa käytössä olevien paikallisten kiskovikojen korjausmenetelmien lisäksi on olemassa muitakin mahdollisuuksia vikojen korjaamiseksi. Näitä ovat leveärakotermiittihitsaus ja hamaran termiittikorjaushitsaus.

Leveärakotermiitti

Leveärakotermiittihitsauksessa hitsattavan raon leveys on menetelmästä riippuen 48 – 80 mm [39]. Tämä mahdollistaa pituussuunnassa leveämpien murtumien korjauksen tavalliseen termiittihitsaukseen nähden. Itse hitsaus vastaa perinteistä termiittihitsausta. Merkittävimpänä erona on, että käytetty termiittiannos on suurempi. Leveämmän hitsausraon ansiosta yhdellä leveärakotermiittihitsillä voidaan korvata kahdella tavallisella termiittihitsillä tehtävät korjaukset sekä osa sovituskiskolla tehtävistä korjauksista. Tämän ansiosta korjaukseen kuluu vähemmän työaikaa ja raide on mahdollista saada nopeammin käyttöön. Gutscherin [87] tekemien tutkimusten mukaan leveärakotermiittihitsien kestävyys on hyvä myös raskaiden akselikuormien alaisuudessa. Noin 150 Mbrt liikennemäärän kokeneissa hitseissä ilmeni ainoastaan vähäistä pinnan plastista muokkautumista ja lohkeilua.

Hamaran termiittikorjaushitsaus

Uusi, vasta testauksessa oleva korjausmenetelmä on hamaran termiittikorjaushitsaus. Menetelmässä, valmistajasta riippuen, hamara hiotaan osittain tai kokonaan pois noin 50 mm matkalta (Kuva 63). Kiskon päälle asetetaan hamaran kattava termiittihitsausmuotti, johon termiittihitsaus tehdään jatkohitsausta vastaavalla tavalla. Käytetty termiittiannos on jatkohitsaukseen tarkoitettua termiittiannosta pienempi, sillä ainoastaan hamaran alueen tulee täyttyä. Gutscherin [88] mukaan hamaran termiittikorjaushitsaus ei ole vielä aivan ongelmaton. Hitseihin muodostuu muun muassa kylmäjuoksuja, joihin ydintyy herkästi säröjä.



Kuva 63 Hamaran termiittikorjaushitsausta varten valmistetut lovet [88].

7.3 Neutraalilämpötilan mittaus

Kuten luvussa 3.2 kerrottiin, neutraalilämpötila on se lämpötila, jossa jatkuvaksi hitsattuun kiskoon ei kohdistu lämpöjännityksiä. Jotta lämpötilanvaihtelut eivät aiheuttaisi kiskoon liian suuria veto- tai puristusjännityksiä, on kiskon neutraalilämpötilan oltava tietyllä neutraalilämpötila-alueella. Suomessa neutraalilämpötila-alueeksi on määritetty $+ 12 - 22 \text{ °C}$ [34]. Mikäli kiskon pituus muuttuu esimerkiksi kiskon korjauksen tai raiteen tukemisen yhteydessä, muuttuu myös kiskon neutraalilämpötila. Kiskon neutraalilämpötila on perinteisesti mitattu katkaisemalla kisko, mittaamalla katkaisun seurauksena tapahtunut pituuden muutos ja laskemalla pituuden muutoksen pohjalta kiskoon vaikuttanut lämpövoima. Lämpövoiman ja kiskon lämpötilan pohjalta on laskettu kiskossa ollut neutraalilämpötila. Tällä tavoin tehty neutraalilämpötilan mittaus on kuitenkin hidasta ja kallista, ja vaatii paljon työvoimaa.

Neutraalilämpötilan helpommaksi mittaamiseksi on kehitetty seuraavanlaisia mittalaitteita [89]:

- Venymäliuskoihin perustuvat mittalaitteet.
- Kiskon nostoon perustuvat mittalaitteet.
- Kiskon magneettisiin ominaisuuksiin perustuvat mittalaitteet.

Venymäliuskoihin perustuissa mittalaitteissa (Kuva 64a) kiskon varteen asennetaan venymäliuskoja. Jotta venymäliuskoilla saadaan mitattua kiskon neutraalilämpötilaa, on asennushetkellä kiskoon vaikuttavat lämpöjännitykset tunnettava. Yleisimmin tämä tapahtuu asentamalla venymäliuskat jännityksistä vapaaseen kiskoon. Mikäli kiskoon vaikuttavia lämpöjännityksiä ei asennushetkellä tunneta, saadaan venymäliuskoilla tietoa ainoastaan suhteellisista jännitysten muutoksista asennushetkeen nähden. [89]

Venymäliuskoilla päästään hyvään mittaustarkkuuteen. Readin [89] mukaan riittävä neutraalilämpötilan mittaustarkkuus on $\pm 5,6 \text{ °C}$. Merkittävä rajoite venymäliuskoihin perustuvassa mittauksessa on kuitenkin niiden kiinteä asennus kiskon varteen. Tämän vuoksi niillä voidaan seurata ainoastaan yhden kohteen neutraalilämpötilan

muuttumista, eikä niitä voi siten käyttää eri kohteiden neutraalilämpötilan tarkastuksiin.

Kiskon nostoon perustuvien mittalaitteiden, kuten kuvassa 64b olevan VERSEn, toiminta perustuu kiskon nostoon tarvittavan voiman muuttumiseen kiskoon vaikuttavan lämpövoiman funktiona. Mittauksessa tietty matka kiskoa irrotetaan kiinnikkeistään ja nostetaan hydraulisen tunkin avulla. Nostetun korkeuden ja nostamiseen tarvittun voiman pohjalta saadaan kiskossa vaikuttava lämpövoima. Nostoon perustuvien mittalaitteiden mittaustarkkuus on hyvä. Yksi mittaus kestää noin 30 minuuttia. Mittaustekniikan huonona puolena on, että mitattavan kiskon on oltava vetojännityksen alaisena eikä sitä voida käyttää alle 700 m säteisissä kaarteissa. [89] Suomessa ainakin Oy VR-Rata Ab:llä on käytössä VERSE-mittalaitteita [90].



Kuva 64 Neutraalilämpötilan mittaukseen tarkoitettu a) venymäliuskoihin perustuva mittalaite [89] sekä b) kiskon nostoon perustuva mittalaite VERSE [90].

Kiskon magneettisiin ominaisuuksiin perustuvat mittalaitteet käyttävät hyväkseen materiaalin ferromagneettisten ominaisuuksien riippuvuutta sisäisestä jännitystilasta. Näistä esimerkkinä Barkhausen-kohinaan perustuva RailScan-mittalaite [91]. Mittalaitteet ovat helppoja ja nopeita käyttää. Kuitenkin, koska materiaalissa olevat jäännös- ja lämpöjännitykset vaikuttavat materiaaliin samalla tavoin, on laitteisto kalibroitava, jotta jännitykset saadaan erotetuiksi toisistaan. Esimerkiksi RailScan-mittalaitteen kalibrointi tapahtuu 3 – 5 m pituisella kalibrointikiskolla, joka on varsinaisen mitattavan kiskon kanssa samaa profiilia ja samalta valmistajalta, jolloin sen jäännösjännitysjakauma vastaa varsinaista kiskoa [89]. Kalibroinnissa kalibrointikiskoa jännitetään pituussuunnassa ja siitä mitataan Barkhausen kohinan voimakkuutta. Tällä tavoin saadaan määritettyä kyseisen kiskoprofiilin kalibraatiokäyrä, joka kuvaa Barkhausen kohinan voimakkuutta pituussuuntaisen jännityksen funktiona. Kalibroinnin jälkeen mittalaitteen tulosten pohjalta on mahdollista laskea kiskon neutraalilämpötila. Kalibroinnin tarkkuudella on merkittävä vaikutus mittauksen tarkkuuteen. [91] Kyseisen tekniikan käyttäminen Suomen rataverkolla olemassa oleviin kiskoihin on haastellista kiskojen laajan kirjon vuoksi. Uusien kiskojen asennuksen laaduntarkkailuun tekniikka sen sijaan voisi soveltua hyvin, sillä tällöin kalibrointi tarvitsee tehdä ainoastaan yhdelle, asennuksessa käytetylle kiskoprofiilille.

Edellä esitettyjen menetelmien lisäksi on myös kehitetty kiskon värähtelyyn ja sen lämpöjännitysriippuvuuteen perustuvaa mittausmenetelmää. Readin [89] mukaan menetelmä ei kuitenkaan sovellu betonipölkkyraiteelle, suorille rataosuuksille eikä sitä voida käyttää neutraalilämpötilan yläpuolella. Kyseistä menetelmää ei siten kuvata tässä yhteydessä tarkemmin.

Readin [92] mukaan nykyisin vartenotettavia neutraalilämpötilan mittausmenetelmiä ovat venymäliuskoihin perustuvat mittalaitteet sekä kiskon nostoon perustuvat mittalaitteet. Venymäliuskoihin perustuvat mittalaitteet soveltuvat tietyn yksittäisen raiteen kohdan neutraalilämpötilan pitkäaikaiseen monitorointiin, kun taas kiskon nostoon perustuvat mittalaitteet soveltuvat neutraalilämpötilan pistetarkastuksiin, esimerkiksi kiskon asennuksen tai kunnossapitotyön jälkeen. Kiskon magneettisiin ominaisuuksiin perustuvat mittalaitteet ovat nopeampia ja helpompia käyttää kuin kiskon nostoon perustuvat mittalaitteet, mutta niiden tarkka kalibroiminen voi vielä aiheuttaa ongelmia.

8 Kiskon uusiminen

Tässä luvussa käsitellään aluksi yleisiä perusteita kiskojen uusimiseksi. Tämän jälkeen tutustutaan viime vuosina Suomessa tehtyihin kiskonvaihtoihin ja niiden todennäköisiin syihin.

8.1 Uusimisen perusteet

Kiskon uusiminen on ajankohtaista, mikäli radassa oleva kisko on liian huonokuntoinen tai radan päällysrakenneluokkaa halutaan nostaa. Kisko on liian huonokuntoinen, kun sillä liikennöinti ei ole enää turvallista tai sen kunnossapitokustannukset ovat liian korkeat. Radan päällysrakenneluokan nosto voi olla ajankohtainen, mikäli kyseisellä radalla aiotaan liikennöidä suuremmilla nopeuksilla tai suuremmilla akselipainoilla.

Esveldin [17] mukaan kiskojen uusiminen on taloudellisinta tehdä muiden radan komponenttien, kuten pölkkyjen ja sepelin uusimisen yhteydessä. Jotta radan kunto pysyisi mahdollisimman tasalaatuisena, uusiminen kannattaa tehdä vähintään 5 – 10 km matkalta kerrallaan.

Pääasialliset syyt kiskojen uusimiseen ovat vikojen määrä kiskoissa sekä kiskojen kulumisen. Vikojen määrää seurataan vikatiheyden avulla, joka määritellään vuoden aikana ilmenneiden vikojen määränä kilometriä kohti (vikaa/km/vuosi). Erilaisista seurattavista vioista väsymisvialat ovat ensisijaisia, sillä niitä syntyy kiskon iän myötä enemmän. Esimerkiksi ympärilyöntijäljet sen sijaan syntyvät kiskoon kiskosta itsestään riippumatta, eivätkä ne siten kuvaa kiskon väsymiskestävyyttä. Kun kiskon vikatiheys nousee tiettyä tasoa korkeammaksi, on kannattavampaa uusida koko kisko, kuin pyrkiä korjaamaan yksittäisiä vikoja.

RATO 11 Radan päällysrakenne [26] määrittelee kiskoprofiileille 54 E 1 ja 60 E 1 ohjeelliset vaihtorajat. 54 E 1 -profiilin kiskoille se on 300 Mbrt ja 60 E 1 -profiilin kiskoille 450 Mbrt. Vaihtorajat perustuvat kiskon väsymiskestävyyteen, jonka mukaan kyseisen vaihtorajan ylityttyä kiskoon alkaa muodostua niin paljon vikoja, ettei kunnossapito ole enää kannattavaa. Vaihtorajat ovat kuitenkin täysin viitteellisiä ja todellinen väsymiskestävyys riippuu monista eri tekijöistä, kuten liikennöivän kaluston akselipainosta, radan kunnosta, kiskoteräslaadusta, tehdystä kiskonhionnasta ja voitelusta.

Zaremskin [73] mukaan raskaiden akselikuormien rautateillä päätös kiskojen uusimisesta perustuu pääasiassa kiskojen vikatiheyteen, kulumiseen ja pinnan kuntoon. Zaremski [73] on määritellyt kiskon taloudelliseksi vikatiheydeksi 1,25 – 3,75 vikaa/kilometri/vuosi. Mikäli kiskon vikatiheys on tätä suurempi, on sen vaihtaminen ajankohtaista.

8.2 Kiskojen uusiminen Suomessa

Suomessa kisko on uusittava, mikäli sen kuluneisuus tai vikatiheys ylittää RATO 13:ssa Radan Tarkastus [48] annetut raja-arvot. Jatkuvakiskoraiteessa profiilin 54 E 1

ja 60 E 1 kiskojen vertailukuluneisuuden arvo ei saa olla yli 14 mm. Vertailukuluneisuus lasketaan seuraavasti [48]:

$$H = h + \frac{s}{2}, \quad (8.1)$$

jossa H on vertailukuluneisuus, h on korkeuskuluneisuus ja s on sivukuluneisuus (ks. luku 5.1.3). Korkeuskuluneisuudelle ei ole Suomessa erikseen määritetty raja-arvoa, sillä RATO 13:n Radan tarkastus [48] mukaan korkeuskuluneisuutta ei esiinny merkittävästi nykyaikaisilla kiskoteräksillä. Sivukuluneisuuden raja-arvo riippuu paikallisesta nopeusrajoituksesta ja on esitetty taulukossa 16. Vikatiheydet, joiden ylityttyä kisko on uusittava, on esitetty taulukossa 17. Vikatiheyden luetaan mukaan luokkien 1, 2/1 ja 2 mukaiset viat sekä viimeisen tarkastusvälin aikana tapahtuneet kiskonmurtumat [48].

Taulukko 16 Sivukuluneisuuden raja-arvot [48].

Paikallinen nopeus V_{max} [km/h]	Suurin sivukuluneisuus kulkureunassa [mm]
$V_{max} > 160$ km/h	5
$120 < V_{max} \leq 160$ km/h	7
$V_{max} \leq 120$ km/h	7

Taulukko 17 Kiskojen vikatiheyden raja-arvot kiskon vaihtamiseksi kunnossapitotasoille 1AA, 1A, 1, 2 ja 3 [48].

Kunnossapitotaso	Kuormitus [Mbrt/v]	Vikatiheys
1AA, 1A ja 1	> 8	3,0
	5 – 8	3,5
	2 – 5	4,0
	< 2	4,5
2	> 8	3,5
	5 – 8	4,0
	2 – 5	4,5
	< 2	5,0
3	5 – 8	4,0
	2 – 5	4,5
	< 2	5,0

Liikenneviraston tilastojen pohjalta tehdyn analyysin perusteella Suomessa uusitaan kiskoa nykyisin noin 100 – 200 km vuodessa. Uusiminen tehdään pääasiassa ratojen perusrannusten yhteydessä, jolloin myös pölyt ja sepeli uusitaan samalla kertaa. Uusittava kisko on keskimäärin 30 – 50 vuotta vanhaa ja sille kertynyt liikennemäärä on noin 200 – 300 Mbrt. Suurin osa uusitusta kiskosta on painoltaan 54 kg/m. Kun liikennemäärää verrataan kiskolle määriteltyyn ohjeelliseen vaihtorajaan, joka esimerkiksi profiilille 54 E 1 on 300 Mbrt, havaitaan, että kisko poistetaan raiteesta lähes poikkeuksetta ennen kuin kisko saavuttaa kyseisen rajan.

Laajamittaisten, perusparannusten yhteydessä tehtävien kiskonvaihtojen lisäksi Suomessa uusitaan tarpeen mukaan esimerkiksi tiukkojen kaarteiden ulkokiskoja, jotka voimakkaan kulumisen myötä ylittävät sivukuluneisuudelle asetetut raja-arvot. Kulumisen ohella myös vierintäväsymisen aiheuttama sälöily on johtanut ulkokiskon uusimiseen.

Raiteesta poistettu kisko on mahdollista käyttää uudelleen kierrätyskiskona toissijaisella, vähemmän liikennöidyllä rataosuudella. Tällä pyritään parantamaan koko rata-verkon kiskojen tasoa. Kiskot voidaan kohteesta riippuen siirtää suoraan vanhasta kohteesta uuteen tai niille tehdään laitoskunnostus. RATO 11 Radan päällysrakenne [26] mukaan mikäli rataosuuden, jonne kiskot siirretään, suurin sallittu nopeus on > 110 km/h, on kiskoille tehtävä laitoskunnostus. Kiskojen suorasiirroksessa kiskoille on tehtävä ennen siirtoa ultraäänitarkastus niiden riittävän kunnan varmistamiseksi. Laitoskunnostuksessa kiskot luokitellaan niiden kunnan mukaan luokkiin 1 – 4, joista luokka 1 on paras ja luokka 4 heikoin. Luokkien 1 ja 2 kiskoille tehdään kunnostus, luokan 3 kiskot käytetään sellaisenaan esimerkiksi teollisuusraiteisiin ja luokan 4 kiskot romutetaan. Kunnostus käsittää muun muassa vanhojen hitsien, polttoleikattujen päiden sekä vikojen poiston. [93]

9 Yhteenveto, päätelmät ja jatkotutkimus- tarpeet

Tässä työssä on kerrottu kiskon elinkaaren eri vaiheista. Seuraavassa kerrataan työn keskeisimmät seikat sekä pohditaan mahdollisuuksia vaikuttaa kiskon elinkaareen Suomessa. Luvun lopuksi käsitellään ehdotuksia mahdollisista jatkotutkimuskohteista.

9.1 Yhteenveto ja päätelmät

Kiskon mekaanisilla ominaisuuksilla on keskeinen vaikutus kiskon käyttöikään. Kiskon mekaaniset ominaisuudet ovat seurausta kiskon valmistukseen käytetyn teräksen laadusta sekä valmistusprosesseista. Nykyisin Suomeen ostettavien kiskojen tulee olla valmistettu standardin EN13674-1 [11] mukaan, joka velvoittaa valmistajia käyttämään tiettyjä valmistusmenetelmiä, joilla varmistetaan sekä teräksen että siitä valmistettavien kiskojen korkea laatu. Kiskon elinkaaren kasvattamiseksi itse valmistusprosesseihin, muilla kuin kiskon valmistajalla itsellään, ei ole merkittäviä mahdollisuuksia vaikuttaa. Eri valmistajien ja etenkin kiskoteräslaatuojen välillä on kuitenkin eroja, joita hyödyntämällä kiskon elinkaaren taloudellisuutta on mahdollisuus parantaa.

Kiskojen kuljetus ja käsittely ovat kiskon käyttöiän kannalta kriittisiä vaiheita siinä mielessä, että väärin tehtyinä ne voivat lyhentää kiskon käyttöikää merkittävästi tai jopa pilata kiskon kokonaan. Jos käsittelyssä aiheutetaan kiskoihin vaurioita, kuten pintaruhjeita, voivat ne toimia jännityskeskittyminä ja johtaa kiskon ennenaikaiseen murtumaan. Kuljettamalla ja käsittelemällä kiskoja oikeaoppisesti ja huolella, voidaan ennenaikaiselta vioittumiselta välttyä.

Asennuksessa kisko on asennettava oikeaan neutraalilämpötilaan. Suomessa neutraalilämpötila-alue on 12 – 22 °C [34]. Mikäli kiskon neutraalilämpötila jää tämän alueen ulkopuolelle, voi siihen kohdistua erityisen kuumissa tai kylmissä olosuhteissa vahingollisen suuri lämpöjännitys, joka johtaa hellekäyrään tai kiskon murtumaan.

Kiskon jatkoshitsaukseen käytetään nykyisin pääasiassa termiitti- tai leimuhitsausta [61]. Leimuhitsin ominaisuudet vastaavat lähemmin peruskiskon ominaisuuksia, jonka ansiosta sillä saavutetaan termiittihitsiä parempi väsymiskestävyys. Lisäksi leimuhitsien valmistus on vähemmän hitsaajasta riippuvaa, jonka ansiosta ne ovat tasalaatuisempia. Hitsityypistä riippumatta hitsi on epäjatkuvuuskohta kiskossa.

Käytön ja ympäristön rasitusten seurauksena kiskoihin muodostuu moninaisia vikoja. Kiskojen vikaantumisessa on nähtävissä kiskon iästä ja valmistajista riippuvia trendejä. Vikatilastoissa vanhojen kiskojen osuus korostuu uudempiin kiskoihin nähden muun muassa valmistuksen heikomman laadun ja suuremman kertyneen liikennemäärän vuoksi. Suurin osa Suomen rataverkoilla havaituista vioista ilmenee yli 20 vuotta vanhoissa, Imatran ja Azoustaljin valmistamissa kiskoissa.

Toistaiseksi Suomessa ei esiinny merkittävässä määrin kiskon sisäisestä väsymisestä johtuvia vaurioita, kuten poikittaista väsymismurtumaa. Tätä selittää osin kohtalaisen alhaiset akselipainot sekä kiskojen uusiminen melko varhaisessa vaiheessa niiden väsymiskestävyteen nähden. Mikäli kiskon annetaan olla raiteessa pidempään ja sen

kulumista sekä pintavikojen muodostumista hallitaan siten, etteivät ne johda kiskon uusimiseen, voidaan sisäisten väsymismurtumien määrän odottaa lisääntyvän. Tämä asettaa omat haasteensa kiskojen tarkastukselle ja kunnossapidolle.

Suomen radoilla on alkanut ilmetä myös uuden tyyppisiä vikoja, vierintäväsymissäröjä sekä squat-vikoja. Nykyisiä ultraäänitarkastuslaitteita käyttäen niiden havaitseminen varhaisessa vaiheessa on vaikeaa. Vaikka vierintäväsymissäröt johtavat useimmissa tapauksissa ainoastaan pinnan sälöilyyn, voi niiden kasvusuunta toisinaan kääntyä poikittaiseksi ja johtaa kiskon katkeamiseen. Mikäli vierintäväsymissäröt eivät ole ehtineet kasvaa liian syväälle, on niiden poistaminen kiskonhionnalla mahdollista.

Kiskonhionnassa on mahdollista käyttää korjaavaa tai ennaltaehkäisevää hiontstrategiaa. Kirjallisuuden perusteella ennaltaehkäisevää hiontstrategiaa pidetään maailmalla huomattavasti korjaavaa taloudellisempänä ja kiskon käyttöiän kannalta edullisempänä strategiana. Ennaltaehkäisevän hionnan edut tulevat parhaiten esiin, mikäli hiottavalle rataosuudelle on määritetty optimaalinen, muun muassa liikenteen tyyppistä ja radan geometriasta riippuva kiskoprofiili, jota säännöllisellä hionnalla voidaan ylläpitää. Sopivalla kiskoprofiililla pyritään edesauttamaan kiskon ja pyörän välistä vuorovaikutusta ja siten muun muassa vähentämään niiden kulumista ja parantamaan liikkuvan kaluston kaarrekäyttäytymistä. Kun liikkuva kalusto käyttäytyy kaarteessa paremmin, kohdistaa se kiskoon pienempiä voimia ja siten kiskon käyttöikä kasvaa.

Ennaltaehkäisevän hiontstrategian paremmuus korjaavaan nähden riippuu myös vikojen kasvunopeudesta. Mikäli vikojen kasvunopeus kiihtyy niiden koon myötä, on vikojen hallitsemiseksi poistettava materiaalmäärä ennaltaehkäisevällä hionnalla korjaavaan hiontaan nähden vähäisempi. Mikäli särön kasvunopeus pysyy vuorostaan vakiona esimerkiksi 0,2 – 1 mm syvyydellä, ei materiaalmäärässä säästetä, vaikka hiontaa tehtäisiin useammin.

Hionnan ohella kiskoja myös korjataan. Suomessa käytössä olevia korjausmenetelmiä ovat kaaripäällehitsaus, termiittihihitsaus sekä sovituskiskon asennus. Näiden lisäksi maailmalla on käytössä leveärakotermiittihihitsaus ja kehityksen alla hamaran termiittikorjaushitsaus.

Kiskojen vaihtaminen uusiin on ajankohtaista, kun kiskojen kunto on laskenut tiettyjä raja-arvoja alhaisemmaksi tai esimerkiksi rataosuuden päällysrakenneluokkaa halutaan nostaa. Suomessa korvataan tällä hetkellä pääasiassa 54 E 1 -profiilin kiskoja uusilla, 60 E 1 -profiilin kiskoilla. Uusittavat, 54 E 1 -profiilin kiskot kierrätetään tavallisesti asentamalla ne toissijaisille, vähemmän liikennöidyille rataosuuksille.

Työssä esille tulleiden kiskon elinkaaren tekijöiden vaikutuksista kiskon käyttöikään voidaan yleisesti todeta seuraavaa:

- Kiskon mekaaniset ominaisuudet ja kiskoprofiili määräävät, kuinka hyvin kisko kestää liikenteen ja ympäristön rasituksia. Kiskon valmistuksen laadulla on merkittävä vaikutus kiskon kestävyysasteeseen.
- Jatkoshitsit ovat epäjatkuvuuskohtia peruskiskossa. Jatkoshitsien määrällä, hitsien valmistusmenetelmällä sekä hitsien valmistuksen ja viimeistelyn laadulla on suuri vaikutus jatkuvaksi hitsatun kiskon käyttöikään.

- Lämpötilan muutokset kohdistavat jatkuvaksi hitsattuun kiskoon lämpöjännityksiä. Jotta äärimmäiset lämpötilat eivät aiheuta liiallisia jännityksiä kiskoon, on kiskon neutraalilämpötilan oltava minimi- ja maksimilämpötiloihin nähden oikean suuruinen.
- Liikenne rasittaa kiskoa. Kiskoon kohdistuu sitä suurempia voimia, mitä suuremmilla akselipainoilla ja nopeuksilla junat liikennöivät. Myös liikenteen tyypillä (matkustaja/rahti) on vaikutuksensa. Kasvavat liikennemäärät altistavat kiskon väsymiselle.
- Radan paikallisella geometrialla on vaikutus kiskoon kohdistuviin voimiin. Kaarteessa olevaan kiskoon kohdistuu pääsääntöisesti suurempia voimia, kuin suoralla olevaan kiskoon.
- Tarkastustiheydellä ja tarkastuksen laadulla voidaan vaikuttaa siihen, kuinka varhaisessa vaiheessa ja kuinka suuri osa vioista tarkastuksilla havaitaan. Mitä aiemmassa vaiheessa vikoihin voidaan puuttua, sitä pienemmällä työmäärällä päästään.
- Havaittujen vikojen luokittelu vaikuttaa tarvittaviin korjausmääriin ja päätöksiin siitä, korjataan vai vaihdetaan kisko. Mikäli havaittu vika luokitellaan todellista haitallisemmaksi, tehdään turhaa työtä korjattaessa se. Toisaalta, jos vika luokitellaan todellista harmittomammaksi, voi siitä seurata esimerkiksi kiskon katkeaminen.
- Oikein tehtynä kiskonhionnalla on mahdollista parantaa kiskon kuntoa ja kasvattaa sen käyttöikä.
- Kiskojen korjauksella on mahdollista kasvattaa kiskon käyttöikä. Korjattu kisko ei kuitenkaan vastaa uutta, vaan esimerkiksi kaaripäällehitsejä joudutaan toisinaan korjaamaan toistuvasti.

9.2 Jatkotutkimustarpeet

Seuraavassa esitetään tämän työn puitteissa esille tulleita jatkotutkimustarpeita:

- Tutkimalla ja vertailemalla eri valmistajien ja kiskoteräslaatuja kiskoja keskenään on mahdollista löytää eri käyttökohteisiin taloudellisin ratkaisu. Eri kiskojen toimivuutta, esimerkiksi voimakkaasti kuluu kaarteissa, voidaan tutkia asentamalla eri laatuja kiskoja peräkkäin ja tarkkailemalla muun muassa niiden profiilin muutosta ja pinnan kuntoa tietyin väliajoin. Suhteuttamalla tutkimuksen tulokset eri kiskojen hankinta- ja kunnossapitokustannuksiin voidaan eri vaihtoehtojen taloudellisuutta arvioida.
- Suomessa on vasta muutaman viime vuoden aikana tiedostettu pintaan ydintyvien vierintäväsymissäröjen esiintyminen rataverkolla. Vian tyypistä riippuen, se voi äkillisesti johtaa kiskon katkeamiseen useisiin osiin. Jotta ilmiön laajuus tunnetaan, on selvitettävä, millaisissa paikoissa Suomen rataverkolla kyseinen vika ilmenee. Samoin on pyrittävä selvittämään, minkä tyyppinen kalusto vikaa pääasiassa aiheuttaa. Lisäksi ilmiön vakavuuden selvittämiseksi on tutkittava, miten Suomessa ilmenevät vierintäväsymissäröt vaikuttavat kiskon kuntoon: johtavatko säröt pelkästään kiskon pinnan säilytyyn vai kääntyykö osa säröistä poikittaisiksi, johtaen mahdollisesti kiskon katkeamiseen. Tutkimuksessa voidaan kartoittaa myös säröjen kasvunopeutta, jota on mahdollista hyödyntää esimerkiksi kiskonhionnan suunnittelussa. Pinnan alle muodostuvien vierintäväsymissäröjen ilmenemistä on myös selvitettävä.

- Koska varhaisessa vaiheessa olevien vierintäväsyröjen havaitseminen tällä hetkellä käytössä olevilla tarkastusmenetelmillä ei ole todennäköistä, on vaihtoehtoisten menetelmien toimivuutta ja käytettävyyttä selvitettävä. Selvittämisen arvoisia menetelmiä ovat esimerkiksi kaksoiskideluotaimen käyttö ultraäänitarkastuksessa, tarkempi visuaalinen tarkastus sekä pyörrevirtatarkastuksen käyttö. Toimivaksi todettuja menetelmiä voitaisiin käyttää tavallisen tarkastuksen lisänä kohteissa, joissa vierintäväsyröjen voidaan odottaa ilmenevän. Pyörrevirtatarkastuksen mahdollisuuksia särkeiden pituuden määrittämiseksi tulee myös selvittää.
- Kiskoisiin muodostuneita vierintäväsyröjä on mahdollista poistaa kiskonhionnalla. Jotta vierintäväsyröt eivät pääse kasvamaan niin syväälle, ettei niiden poistaminen kiskonhionnalla ole enää kannattavaa, tulee kiskoja hioa riittävän usein. Optimaalinen hiontaintervalli on mahdollista määrittää kokeilemalla erilaisia hiontaintervalleja. Käytännössä tämä tapahtuu valitsemalla kaarre, johon tiedetään muodostuvan vierintäväsyröjä. Tämä kaarre jaetaan tietyn pituisiin osuuksiin, joista osa jätetään hiomatta ja osaa hiotaan tietyin intervalein. Tarkkailemalla kiskon pinnan kuntoa ja profiilin muutosta voidaan käytetyistä intervaleista valita toimivin vaihtoehto.
- Jotta kiskonhionnasta saataisiin suurin hyöty, tulee niin suorille rataosille kuin kaarteillekin määrittää hionnalla tuotettavat optimaaliset kiskoprofiilit. Koska optimaalisen kiskoprofiilin riippuu muun muassa radalla liikennöivästä kalustosta, on todennäköisimmin mielekästä määrittää erilaiset profiilit eri liikennetyyppien käyttämille rataosuksille. Erilaiset profiilit tulisi siis määrittää rataosuksille, joilla liikennöi pelkästään rahtiliikennettä sekä rataosuksille, joilla liikennöi sekä rahti- että matkustajaliikennettä. Myös itäinen yhdystiikenne tulee ottaa huomioon.
- Tietyissä tapauksissa kahdella termiittihitsillä tai palanvaihdolla tehtävä korjaus on mahdollista korvata yhdellä leveärakotermiittihitsillä. Leveärakotermiittihitsin käytöstä tulisi tutkia, missä tapauksissa kyseisen menetelmän käyttö on perinteisiä taloudellisempaa ja päästäänkö kyseisellä menetelmällä perinteisiä vastaavaan, kestävään lopputulokseen.
- Neutraalilämpötilan mittaamiseksi Suomessa on käytetty muun muassa VERSE-mittalaitetta. Kyseisen laitteen käyttö on kuitenkin kohtuullisen työlästä ja vaihtoehtoisten menetelmien, kuten Barkhausen-kohinaan perustuvi- en mittalaitteiden käyttöä Suomen olosuhteissa kannattaisi selvittää.
- Kiskojen vikaantuminen ja kulumisen on pääasiassa seurausta liikkuvan kaluston aiheuttamista rasituksista. Täten eri kalustotyyppien vaikutuksia kiskoon tulisi tutkia. Erilaisten pyöräprofiilien ja -materiaalien vaikutusta kiskon kuntoon tulisi myös tutkia.

Lähteet

- [1] Lindroos, V., Sulonen, M. & Veistinen, M. Uudistettu 1-ojan metallioppi. Keuruu 1986, Otava. 841 s.
- [2] Teräskirja. Helsinki 2003, Metallinjalostajat ry. 76 s.
- [3] Bramfitt, B.L. & Lawrence, S.J. Metallography and Microstructures of Carbon and Low-Alloy Steels. In: ASM Handbook: Volume 9: Metallography and Microstructures. USA 2004, ASM International. 1150 p.
- [4] Honeycombe, R.W.K. & Bhadeshia, H.K.D.H. Steels: Microstructure and Properties, 2nd ed. London 1995, Edward Arnold. 324 p.
- [5] Callister, W.D. Jr. Materials Science and Engineering, 6th ed. New York 2003, Wiley. 848 p.
- [6] Aliya, D. & Lampman, S. Solid-State Phase Transformations. In: ASM Handbook: Volume 9: Metallography and Microstructures. USA 2004, ASM International. 1150 p.
- [7] Ratatekniset ohjeet (RATO) 12. Päälysrakennehitsaus. 1998 [verkkodokumentti]. [viitattu 10.2.2010]. Saatavissa:
<http://www.rhk.fi/@Bin/1704876/RAMO%2012%20P%C3%A4%C3%A4lysrakennehitsaus.pdf>
- [8] Bhadeshia, H.K.D.H. Bainite in Steels, 2nd. ed. London 2001, IOM Communications Ltd. 454 p.
- [9] Lichtberger, B. Track Compendium: Formation, Permanent Way, Maintenance, Economics. Hamburg 2005, Eurailpress Tetzlaff-Hestra GmbH & Co. KG. 634 p.
- [10] Steele, R.K., Rungta, R. & Rice, R.C. Improved Fatigue Life of Rails By Metallurgical Cleanliness. Report no. R-652. Chicago, Illinois, USA 1987, Association of American Railroads Research and Test Department. 36 p.
- [11] SFS-EN 13674-1 + A1. Kiskoliikenne. Rata. Kiskot. Osa 1: 46 kg/m ja enemmän painavat vignole-kiskot = Railway applications. Track. Rail. Part 1: Vignole railway rails 46 kg/m and above. Helsinki 2008. 107 s.
- [12] Rail Defect Manual. USA 1999, Sperry Rail Service. 76 p.
- [13] Teräskirja -verkkosivu. [WWW] [Viitattu 24.3.2010] Saatavissa:
<http://www.teknologiateollisuus.fi/fi/ryhmat-ja-yhdistykset/2.html>
- [14] Hay, W.W. Railroad Engineering, John Wiley & Sons, 1966 USA. 483s.
- [15] Kapoor, A., Fletcher, D.I., Franklin, F.J., Beagles, A.E., Burstow, M., Allen, R., Evans, G. & Jaiswal, J. Management and Understanding of Rolling Contact Fatigue Literature Review. UK 2006, Rail Safety and Standards Board. 78 p.

- [16] Mishra, B. Steelmaking Practices and Their Influence on Properties. In: Davis, J.R. (ed.). Metals Handbook, 2nd ed. USA 1998, ASM International. 1521 p.
- [17] Esveld, C. Modern Railway Track, 2nd Ed. Zaltbommel 2001, MRT-Productions. 654 p.
- [18] Schleinzer, G & Fischer, F.D. Residual stress formation during the roller straightening of railway rails. International Journal of Mechanical Sciences 43(2001)10. pp. 2281 – 2295.
- [19] Pat. US 4597283 Method for straightening a rail and straightened rail (Deroche, R-Y., Bourdon, Y & Faessel, A) Appl. No. 392216, 25.6.1982.(1.7.1986) 13 s. [WWW].[Viitattu 5.3.2010]. Saatavissa: <http://www.freepatentsonline.com/4597283.pdf>
- [20] Heyder, R & Girsch, G. Testing of HSH rails in high-speed tracks to minimise rail damage. Wear 258(2005)7-8. pp. 1014-1021.
- [21] UIC Leaflet 860. Technical specification for the supply of rails, 9th ed. 2008, International Union of Railways. 32 p.
- [22] Päätös ratakiskojen tunnusten muuttamisesta. 1998, Ratahallintokeskus, Tekninen yksikkö. 3 s.
- [23] Fee, A. Selection and Industrial Applications of Hardness Tests: Hardness and Tensile Properties. In: ASM Handbook, Volume 8, Mechanical Testing and Evaluation. USA 2000, ASM International. 998 p.
- [24] Technical specification for rails. 2000, Finnish Rail Administration, Technical Unit. 4 p.
- [25] Bramfitt, B.L., Role of Microstructure: Structure/Property Relationships in Irons and Steels. In: Davis, J.R. (ed.). Metals Handbook, 2nd ed. USA 1998, ASM International. 1521 p.
- [26] Ratatekniset ohjeet (RATO) 11. Radan päällysrakenne. 2002 [verkkodokumentti]. [viitattu 15.2.2010]. Saatavissa: <http://www.rhk.fi/@Bin/1704873/RAMO%2011%20Radan%20p%C3%A4%C3%A4llysrakenne.pdf>
- [27] Vossloh Cogifer, Points and Crossings -esite. 13 p. [WWW]. [Viitattu 20.7.2010] Saatavissa: <http://www.cogifer.com/download/PointsAndCrossings.pdf>
- [28] Viitala, T. Ylitarkastaja, Liikennevirasto. Helsinki. Kirjeenvaihto sähköpostitse.
- [29] Suomen Rautatietilasto 2009. Helsinki, 2009, Ratahallintokeskus. 54 s. [Verkkodokumentti]. [Viitattu: 24.3.2010]. Saatavissa: <http://www.rhk.fi/@Bin/2922317/srt09.pdf>
- [30] Mutton, P., Battisti, C., Swartz, M. & Gutscher, D. Rail Welds. In: Leeper, J. (ed.). Guidelines to Best Practices for Heavy Haul Railway Operations: Infrastructure Con-

struction and Maintenance Issues. Virginia, USA 2009, International Heavy Haul Association. pp. (3-28) – (3-45).

[31] Köstermann, H & Meissner, K. Schienen und Schienenschweissen. In: Fendrich, L (ed.) Handbuch Eisenbahninfrastruktur. Berlin 2007, Springer Verlag GmbH. pp. 309 – 337.

[32] Ratakiskojen tekniset toimitusehdot Kerava-Lahti oikoradan ratakiskoille kisko-profiilille 60 E 1. 2003, Ratahallintokeskus, Kunnossapitoyksikkö. 3 s.

[33] Fischer, F.D. & Schleiner, G. Residual Stress Formation and Distortion of Rail Steel. In: Totten, G.E., Howes, M.A.H. & Inoue, T. (eds.). Handbook of residual stress and deformation of steel. USA 2002, ASM International. 499 p.

[34] Ratatekniset ohjeet (RATO) 19. Jatkuvakiskoraiteet ja -vaihteet. 1998, Ratahallintokeskus. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 20.7.2010]. Saatavissa: <http://www.rhk.fi/@Bin/1704900/RAMO%2019%20Jatkuvakiskoraiteet%20ja%20vaihteet.pdf>

[35] Rautanen, P. Jatkuvakiskoraidepäivät: Jatkuvakiskoraideoppi. Hyvinkää 1998, Oy VR-Rata Ab

[36] Schwartz, B. Thermit Welding. In: ASM Handbook: Volume 6: Welding, Brazing, and Soldering, 10th ed. USA 1993, ASM International. 1299 p.

[37] Thermit Welding Process, Thermit Welding (GB) Ltd. -verkkosivu. [WWW]. [Viitattu 14.4.2010] Saatavissa: <http://www.thermitwelding.com/index.php?page=process>

[38] Päälysrakenteen hitsaustekniset määräykset ja ohjeet (HTMO). Helsinki 1980, Valtionrautatiet, Rataosasto.

[39] Thermit Welding (GB) Ltd. -verkkosivu. [WWW]. [Viitattu 14.4.2010] Saatavissa: <http://www.thermitwelding.demon.co.uk/profile.html>

[40] Tiainen, T. Metallien liittämismenetelmät –opintomoniste. Tampere 2009, Tampereen teknillinen yliopisto. 216 s.

[41] Procedure Development and Practice Considerations for Resistance Welding. In: ASM Handbook: Volume 6: Welding, Brazing, and Soldering, 10th ed. USA 1993, ASM International. 1299 p.

[42] Rail Defects Handbook. Australia 2006, Australian Rail Track Corporation Ltd. 68 p. [Verkkodokumentti] [Viitattu 20.7.2010] Saatavissa: http://extranet.artc.com.au/docs/engineering/tech_bulletins/manuals/section01/rc2400_rail_defects_handbook.pdf

[43] Cannon, D.F., Edel, K.-O., Grassie, S.L., & Sawley, K. Rail defects: an overview. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures 26(2003)10, pp. 865-887.

[44] Stone, D., LoPresti, J., Marich, S., Zahkarov, S. & Naumov, A. Rails. In: Leeper, J. (ed.). Guidelines to Best Practices for Heavy Haul Railway Operations: Infrastructure

Construction and Maintenance Issues. Virginia, USA 2009, International Heavy Haul Association. pp. 3-2 – 3-28.

[45] Zerbst, U., Lunden, R., Edel, K. & Smith, R. Introduction to the damage tolerance behaviour of railway rails - a review. *Engineering Fracture Mechanics* 76(2009)17, pp. 2563 – 2601.

[46] Zakharov, S. Part 3: Wheel/Rail Performance. In: *Guidelines to Best Practices for Heavy Haul Railway Operations: Wheel and Rail Interface Issues*. USA 2001, International Heavy Haul Association. pp. 3-1 – 3-86

[47] Kalousek, J. Wheel/rail damage and its relationship to track curvature. *Wear* 258(2005)7-8. pp. 1330-1335.

[48] Ratatekniset ohjeet (RATO) 13. Radan Tarkastus. 2006, Ratahallintokeskus. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 10.6.2010]. Saatavissa: <http://www.rhk.fi/@Bin/1704879/RAMO%2013%20Radan%20tarkastus.pdf>

[49] UIC Leaflet 712. Rail Defects, 4th ed. 2002, International Union of Railways. 111 p.

[50] Tanabe, N., Hirota, Y., Omichi, T., Hirama, J. & Nagase, K. Study on the Factors Which Cause the Wheel Skidding of JR Ltd. Express EMUs. *JSME International Journal* 47(2004)2. pp. 488 – 495.

[51] Bayer, R.G. Design for Wear Resistance. In: *ASM Handbook: Volume 20, Materials Selection and Design*. USA 1997, ASM International. 900 p.

[52] Grassie, S.L. Rail Corrugation. In: Lewis, R. & Olofsson, U. (eds.) *Wheel-Rail Interface Handbook*. Cambridge, UK 2009, Woodhead Publishing. pp. 349 – 376

[53] Kiskonhionnan tekniset toimitusehdot. 2001, Ratahallintokeskus, Kunnossapitoyksikkö. 11 s.

[54] Grassie, S.L. Rail corrugation: characteristics, causes, and treatments. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* 223(2009)6. pp. 581-596.

[55] Magel, E., Sroba, P., Sawley, K. & Kalousek, J. Control of Rolling Contact Fatigue of Rails. Centre for Surface Transportation Technology, National Research Council Canada. 29 p. [WWW]. [Viitattu 25.6.2010]. Saatavissa: http://www.arena.org/eseries/scriptcontent/custom/e_arena/library/2004_Conference_Proceedings/00011.pdf

[56] Stanford, J., Sroba, P & Magel, E. Burlington Northern Santa Fe Preventive-Gradual Grinding Initiative: Presentation for AREMA 1999 Track & Structures Conference, Chicago, Illinois, September 14, 1999. 9 p.

[57] Marich, S. Managing the wheel-rail interface: the Australian experience. In: Lewis, R. & Olofsson, U. (eds.) *Wheel-Rail Interface Handbook*. Cambridge, UK 2009, Woodhead Publishing. pp. 759 – 791.

[58] Li, Z., Molodova, M., Zhao, X. & Dollevoet, R. Squat Treatment by Way of Minimum Action Based on Early Detection to Reduce Life Cycle Costs. Proceedings of the 2010 Joint Rail Conference. April 27-29, 2010, Urbana, IL, USA. 7 p.

[59] Zhang, H.W., Ohsaki, S., Mitao, S., Ohnuma, M. & Hono, K. Microstructural investigation of white etching layer on pearlite steel rail. Materials Science and Engineering: A 421(2006)1-2. pp. 191-199.

[60] Lojkowski, W., Djahanbakhsh, M., Burkle, G., Gierlotka, S., W. Zieliński, S. & Fecht, H.-J. Nanostructure formation on the surface of railway tracks. Materials Science and Engineering: A 303(2001)1-2 pp. 197-208.

[61] Viitala, T. Ylitarkastaja. Liikennevirasto. Helsinki. Haastattelu 7.6.2010.

[62] Garcia, G., Snell, M.E., Davis, D.D., Trevizo, M.C. & Plotkin, D. Flaw Characterization of Rail Service Failures. Report No. R-963. USA 2003, American Association of Railroads, Transportation Technology Center, Inc. 160 p.

[63] AREMA Manual for Railway Engineering: Chapter 4: Rail. USA 2009, American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association. 248 p.

[64] Gutscher, D. Thermite Maintenance Weld Performance at FAST (TD-07-017). TTCI Technology Digest. USA, June 2007. 4 p.

[65] Gutscher, D. Senior Engineer, Transportation Technology Center Inc. Pueblo, CO. Haastattelu 11.5.2010.

[66] Hellier, C. Handbook of Nondestructive Evaluation. 2001, McGraw-Hill Professional Publishing. 594 p.

[67] NDT Resource Center, Community College Education Material. [WWW] [Viitattu 20.6.2010] Saatavissa: <http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/communitycollege.htm>

[68] Martikainen, J. & Niemi, E. NDT-tarkastuksen käsikirja. Helsinki 1993, Suomen Hitsaustieto Oy. 138 s.

[69] Tunna, J. PowerPoint -esitys Ratahallintokeskukselle. Helsinki 20.11.2009.

[70] Federal Railroad Administration Ultrasonic Testing (UT) Level I Training - PowerPoint -esitys.

[71] Halmshaw, R. Non Destructive Testing, 2nd Ed. Lontoo 1991, Edward Arnold. 323 p.

[72] Rail Testing Trolley -tuote-esite. GE Inspection Technologies. [WWW] [Viitattu 21.4.2010] Saatavissa: http://www.geinspectiontechnologies.com/download/products/ut/pc/saprobess/rail_testing/SPG2-35344EN.pdf

[73] Zarembski, A.M. Review of Defect Management and Testing Practices. In: Proceedings of Rail Defect Workshop, Pueblo, Colorado, 22-23 July, 1997. USA 1997, TTC.

- [74] Garcia, G. Principal Investigator II, Transportation Technology Center Inc. Pueblo, CO. Haastattelu 27.5.2010.
- [75] Patrick, C.M., Havira, M. & Garcia, G.A. Induction Testing. In: Leeper, J. (ed.). Guidelines to Best Practices for Heavy Haul Railway Operations: Infrastructure Construction and Maintenance Issues. Virginia, USA 2009, International Heavy Haul Association. p. (4-7).
- [76] Rautatievirasto. Radan rakenteet ja Kunnossapito, Määräys (RVI/902/431/2009). Helsinki 2009, Rautatievirasto. 20 s.
- [77] Glavin, W.E., Aspebakken, J.I. & Besch, G.O. Heavy Haul: The Burlington Northern Perspective. Proceedings of the Fourth International Heavy Haul Railway Conference, Brisbane, QLD, Australia, 11 – 15 September, 1989. Australia 1989, The Institution of Engineers. pp. 276-285.
- [78] Grassie, S.L. Maintenance of the wheel-rail interface. In: Lewis, R. & Olofsson, U. (eds.) Wheel-Rail Interface Handbook. Cambridge, UK 2009, Woodhead Publishing. pp. 576 – 607.
- [79] Marx, L, Moßmann, D & Kullmann, H. Work procedures for maintenance of the permanent way of the DB Netz AG, 6th Ed. Germany 2006, DB Netz AG. 792 p.
- [80] Magel, E., Roney, M., Kalousek, J. & Sroba, P. The blending of theory and practice in modern rail grinding. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures 26(2003)10, pp. 921-929.
- [81] Sroba, P. & Roney, M. Rail Grinding Best Practices. 2003. 63 p. [Verkkodokumentti] [Viitattu 18.6.2010] Saatavissa: http://www.arena.org/eseries/scriptcontent/custom/e_arena/library/2003_Conference_Proceedings/0062.pdf
- [82] Corrosion Characteristics of Carbon and Alloy Steels. In: Davis, J.R. (ed.). Metals Handbook, 2nd ed. USA 1998, ASM International. 1521 p.
- [83] Carroll, R.I. & Beynon, J.H. Decarburisation and rolling contact fatigue of a rail steel. Wear 260(2006)4-5, pp. 523-537.
- [84] SFS-EN 13231-3:en. Kiskoliikenne. Rata. Töiden hyväksyminen. Osa 3: Hionnan, jyrsinnän ja höyläyksen hyväksyminen = Railway applications. Track. Acceptance of works. Part 3: Acceptance of rail grinding, milling and planing work in track. Helsinki 2006. 40 s.
- [85] MiniProf Rail -mittalaitteen tuotekuvaus. 2 s. [WWW]. [Viitattu 7.6.2010] Saatavissa: <ftp://195.97.146.80/miniprof/pdf/MiniProf-Rail.pdf>
- [86] Nummelin, M. & Ojanperä, K. Kiskon hionta: Kehitys Suomessa. 1995, Ratahallintokeskus. 3 s.
- [87] Gutscher, D., Li, D., & McDaniel, R. Preliminary Performance of Wide-Gap Welds at Eastern Mega Site (TD-09-012). TPCI Technology Digest. USA, April 2009. 4 p.

[88] Gutscher, D. Results of Thermitite Railhead Repair Weld Testing at FAST (TD-09-036). TTCI Technology Digest. USA, December 2009. 4 p.

[89] Read, D. M. Rail Stress Measurement Technologies. In: Leeper, J. (ed.). Guidelines to Best Practices for Heavy Haul Railway Operations: Infrastructure Construction and Maintenance Issues. Virginia, USA 2009, International Heavy Haul Association. pp. (4-21) – (4-26).

[90] Verse-esite. Vortok International. [WWW]. [Viitattu 19.8.2010]. Saatavissa: <http://www.vortok.co.uk/ProductBrochures/Verse/English%20VERSE%20Brochure.pdf>

[91] Zhang, R. Using Magnetic Barkhausen Noise Technology and Numerical Method to Study the Condition of Continuous Welded Rails on Australian Heavy Axle Track. Proceedings of the 9th International Heavy Haul Conference, Shanghai, China, June 2009. China 2009, China Railway Publishing House. pp. 153 – 160.

[92] Read, D. M. Principal Investigator, Transportation Technology Center Inc. Pueblo, CO. Haastattelu 28.5.2010.

[93] Kierrätyskiskojen tekniset toimitusehdot. 2001, Ratahallintokeskus. 8 s. [verkko-dokumentti]. [Viitattu 19.8.2010]. Saatavissa: <http://www.rhk.fi/@Bin/1788475/Kierr%C3%A4tyskiskojen%20teknitoimehdot>

Liik
enne
vira
sto

ISSN-L 1798-6656

ISSN 1798-6664

ISBN 978-952-255-611-0

www.liikennevirasto.fi