Valukomponentin simulointiavusteinen suunnittelu haastaviin käyttökohteisiin

Laine Jarkko

© WÄRTSILÄ

Luennoitsijan esittely

Jarkko Laine

Lead Expert, valutekniikka

Materiaalit ja tribologia

Tutkimus, kehitys ja tekniikka

Koulutus

- DI 1999 Tampereen teknillinen yliopisto, materiaalitiede
- TkT 2021 Aalto-yliopisto, Insinööritieteiden korkeakoulu
  (vuoden 2021 parhaan väitöskirjan palkinto)

Tausta – Työkokemus

- 1998–2006 Tutkimusinsinööri, Tampereen teknillinen yliopisto, Valimoinstituutti / Materiaaliopin laitos

Wärtsilä:

- 2006–2012 Senior Foundry Expert, valmistusteknologiapalvelut/ME Finland
- 2012–2016 Senior Engine Expert, voimajärjestelmät
- 2016–2025 Chief Engine Expert, materiaalit ja tribologia
  - Materiaali- ja menetelmäkehitys
  - Valusimulaatiot (MagmaSoft 2009-)
  - Taonta ja taontasimulaatiot (Transvalor Forge 2023–)
- 2025– Lead Expert, valutekniikka



Ä

MagmaSoftin käyttäjä vuodesta 2009

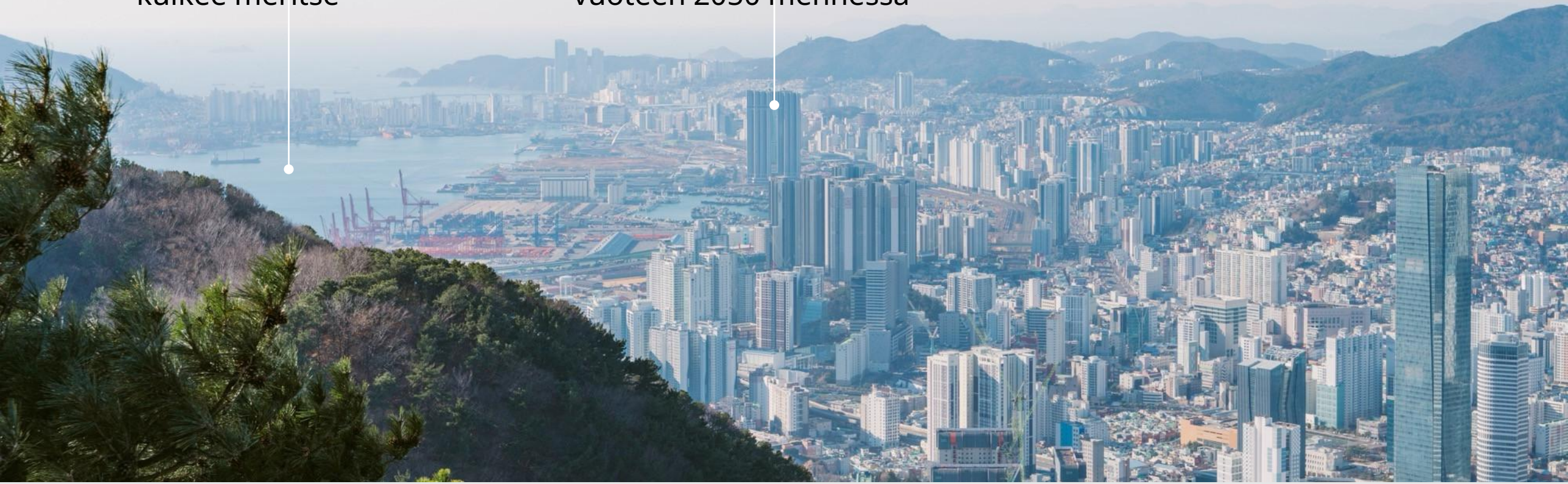
© WÄRTSILÄ

Arkemme nojaa sähköön ja maailmanlaajuisesti kuljetettaviin tavaroihin

1/3 maailman kasvihuonekaasuista syntyy merenkulku- ja energia-aloilla

Lähes 90 %
maailmankaupasta
kulkee meritse

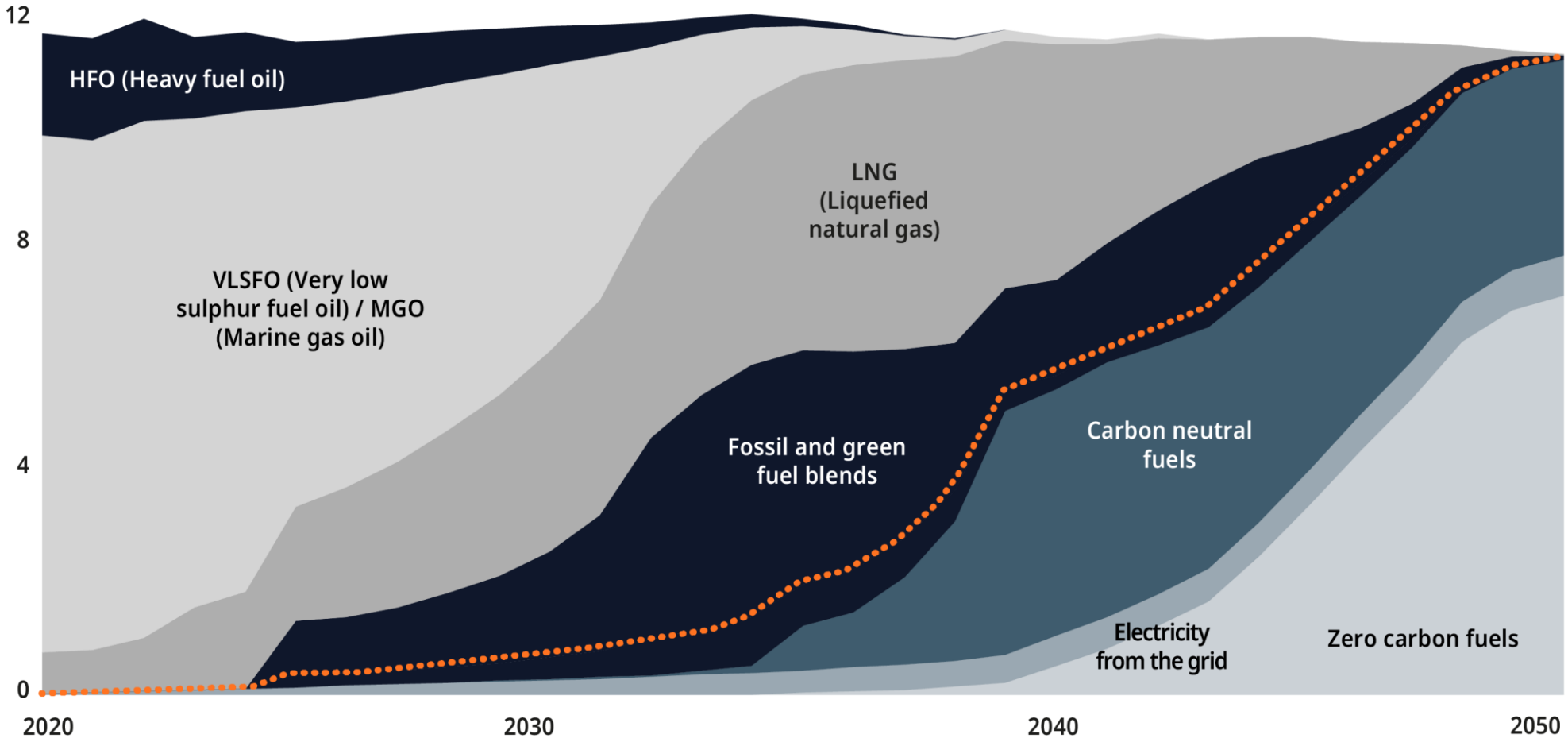
Sähkön kysynnän odotetaan
vähintään kaksinkertaistuvan
vuoteen 2050 mennessä



Public

Siirtyminen yhden polttoaineen teollisuudesta monipolttoaineiseen

Polttoainetyyppien jakautuminen hiilidioksidipäästöjen vähentämiseksi 2050



Source: DNV Maritime Forecast 2050 model, Wärtsilä internal estimates

© WÄRTSILÄ

Sustainable Technology Hub nopeuttaa 4S-teknologian kehitystä

Virstanpylväitä vähä- tai nollahiilisissä teknologioissa ja tuotteissa

Metanoli

- 2015: Ensimmäinen moottorimuunnos ZA40S
- 2023: Ensimmäisten W32-metanolimoottoreiden toimitus. Uusien moottorimallien ja moottorimuunnospakettien myynnin aloitus

Ammoniakki

- 2022: Poltto- ja suorituskykytestaus, optimointi eri moottorikonsepteilla ja eri moottorialustoilla
- 2023: Ensimmäisten uusien moottorien ja moottorimuunnospaketin myynnin aloitus

Vety

- 2022–2023: Palamiskokeet eri seossuhteilla ja jopa 100 % vedyllä
- 2025: Vetykonseptin lanseeraus (SCE testaus)
- 2026: Täysikokoisen (10W31) vetymoottorin testaus



© WÄRTSILÄ

	“Family car”; VW 2.0 TDI	W6L20; Marine aux	W6L32, Marine	W10V31	W18V46TS Power plant
Bore / Stroke (mm)	81 / 95.5	200 / 280	320 / 400	310/430	460 / 580
Cylinder volume (litres/cyl)	0.49	8.8	32.2	32.4	96.4
Cyl output max (kW / RPM)	33.75 / 4000	200 / 1000	580 / 750	610/720	1300 / 600
Engine output (kW)	135	1200	3500	6100	23400
Typical operating point Load (kW) / RPM	**~15 / 1500** (90km/h)	**(200)…1020 / 1000**	**2550 / 710…750**	**4270/760**	**23400 / 600**
Max boost pressure (bar)	~1.1-1.5	3.9	3.4	~8	3.9
Max cylinder pressure (bar)	160-180	200	200	275	230
Fuel consumption at typical load (kg/h)	5	210	480	750	3700
Thermal efficiency (%)	44-45	44-46	47-49	51-52	51-52
Lifetime (h)	~6000 (300 000km)	Piston >60000 Inj pump/nozzle 24000/6000 Crank shaft >20years	=	=	=

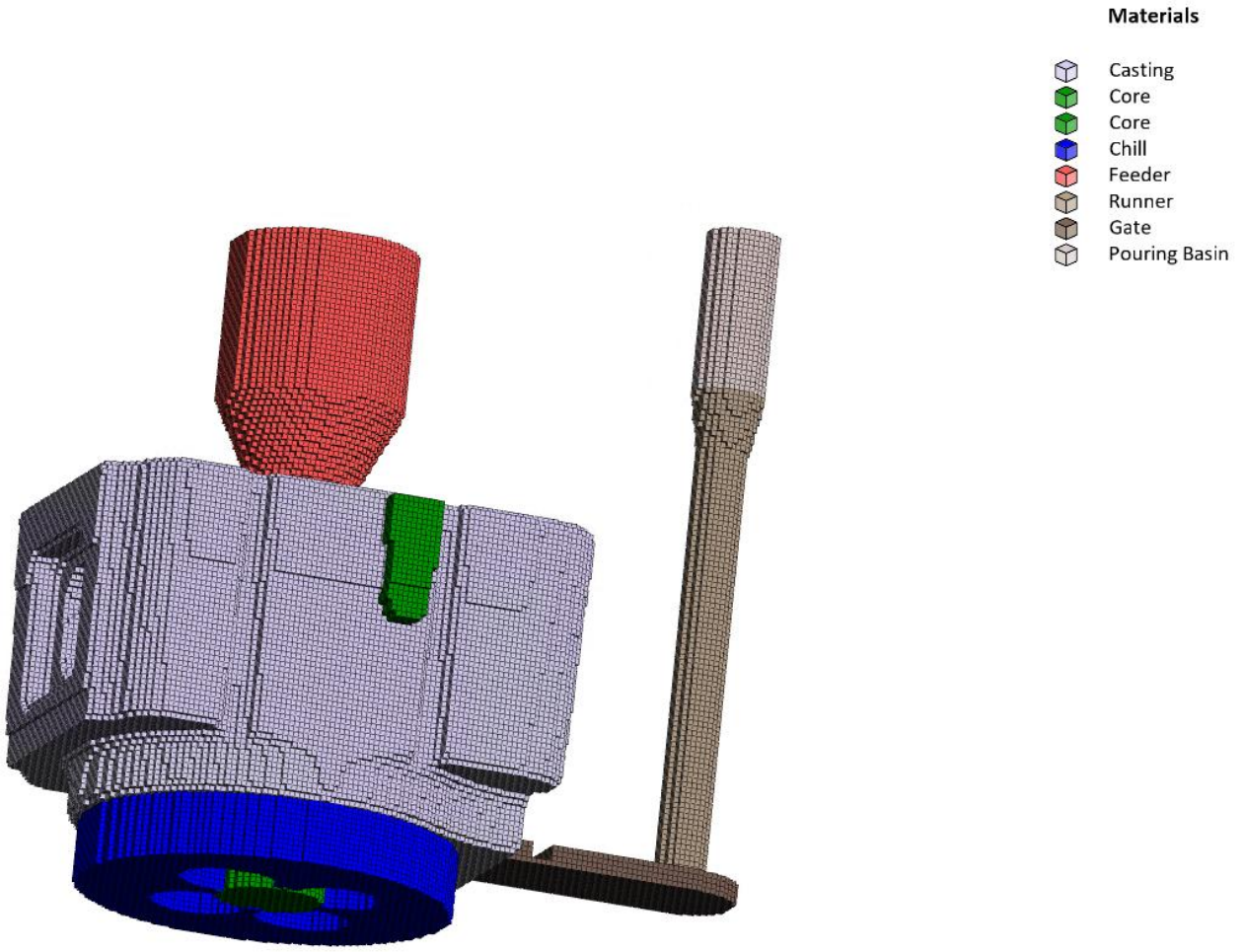
© WÄRTSILÄ

Valusimulaatio

- Kuutiomainen laskentaverkko

Tässä tapauksessa elementtikoko 5 × 5 × 5 mm
Yhteensä 2 188 896 elementtiä, joista 377 044 metallielementtiä

- Laskenta 8 solmulla Windows-tietokoneella
  Tässä tapauksessa laskenta-aika 24 minuuttia



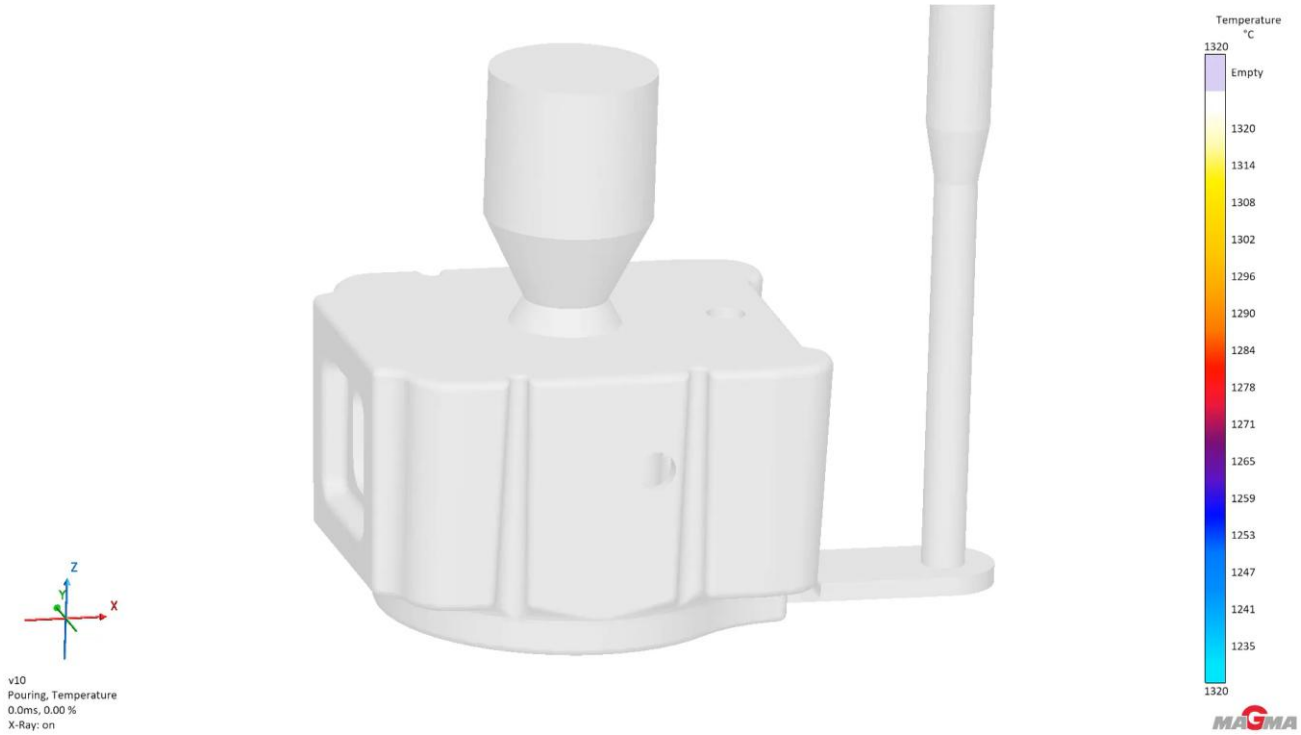
Huomautus: Komponentti on vain materiaalitutkimuksia varten. Se ei ole eikä tule tuotantokäyttöön.

© WÄRTSILÄ

Valunsimulaatio

Valimot käyttävät valusimulaatioita erityisesti kutistumishuokoisuuden arviointiin.

1. Täyttymissimulaatio määrittää oikeat lämpötilakentät.



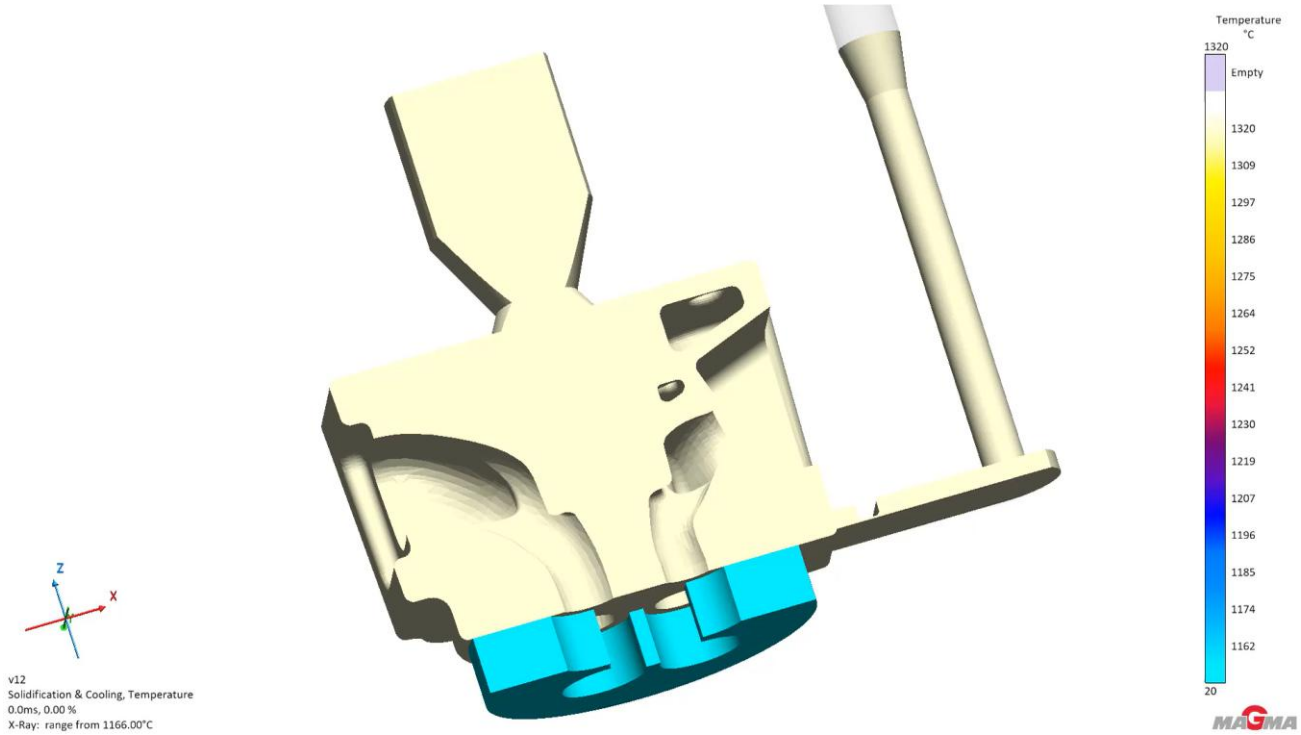
Huomautus: Komponentti on vain materiaalitutkimuksia varten. Se ei ole eikä tule tuotantokäyttöön.

© WÄRTSILÄ

Valusimulaatio/ Jähmettyminen

Valimot käyttävät valusimulaatioita erityisesti kutistumishuokoisuuden arviointiin.

1. Täyttymissimulaatio määrittää lämpötilakentät ja auttaa arvioimaan valukanaviston toimivuutta.
2. Jähmettymissimulaatio ennustaa viimeisenä jähmettyvät kohdat eli hot spotit.



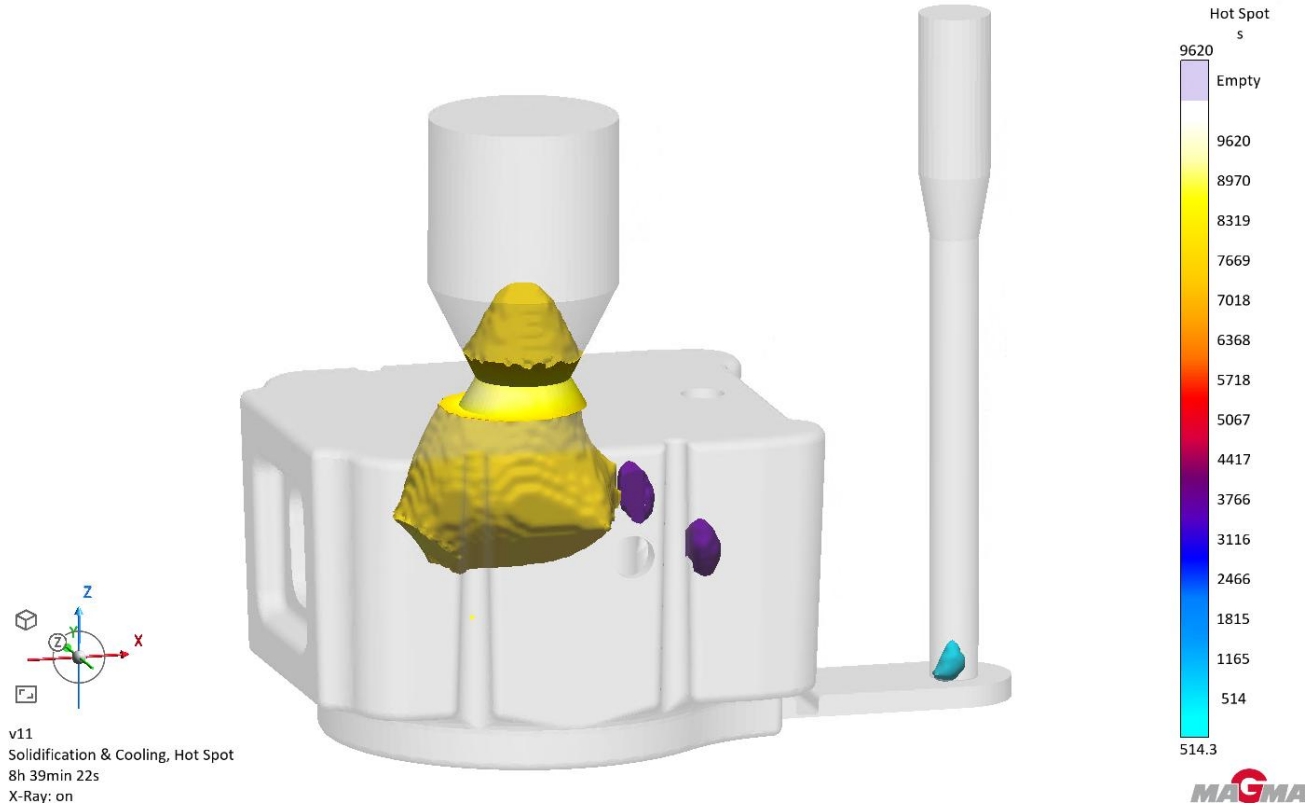
Huomautus: Komponentti on vain materiaalitutkimuksia varten. Se ei ole eikä tule tuotantokäyttöön.

© WÄRTSILÄ

Valusimulaatio

Valimot käyttävät valusimulaatioita erityisesti kutistumishuokoisuuden arviointiin.

1. Täyttymissimulaatio määrittää oikeat lämpötilakentät.
2. Jähmettymissimulaatio ennustaa viimeisenä jähmettyvät kohdat eli hot spotit.



Huomautus: Komponentti on vain materiaalitutkimuksia varten. Se ei ole eikä tule tuotantokäyttöön.

© WÄRTSILÄ

Valusimulaatio

Valimot käyttävät valusimulaatioita erityisesti kutistumishuokoisuuden arviointiin.

1. Täytttymissimulaatio määrittää oikeat lämpötilakentät.
2. Jähmettymissimulaatio ennustaa viimeisenä jähmettyvät kohdat eli kuumat pisteet.
3. Kutistumishuokoisuuden ennuste

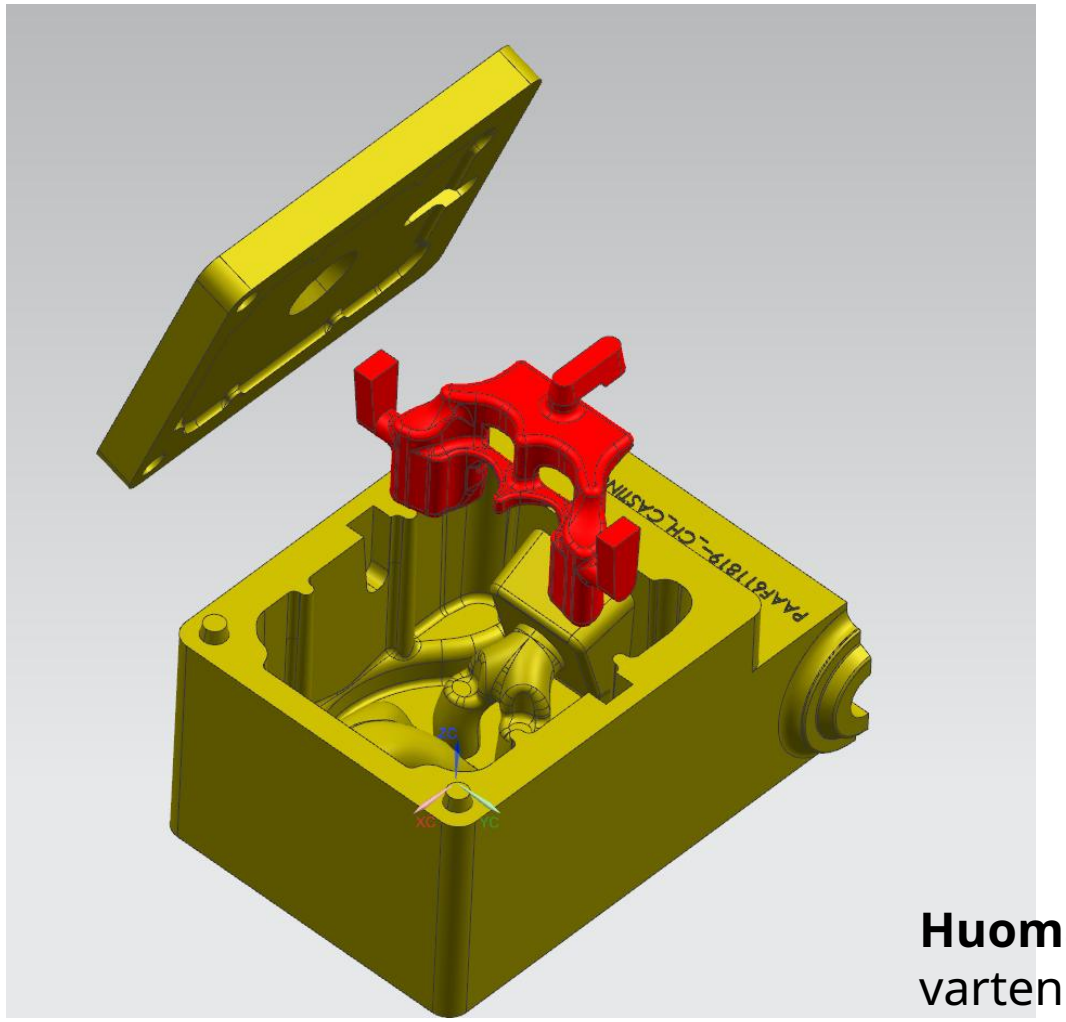


Huomautus: Komponentti on vain materiaalitutkimuksia varten. Se ei ole eikä tule tuotantokäyttöön.

© WÄRTSILÄ

Valusimulaatio

Kun simulaation tulokset ovat hyvät, valu valmistetaan simuloidulla tavalla.





Huomautus: Komponentti on vain materiaalitutkimuksia varten. Se ei ole eikä tule tuotantokäyttöön.

© WÄRTSILÄ

Mitä muuta kaupalliset valunsimulaatio-ohjelmistot voivat ennustaa?

Täyttymine: kaasukuplat, ilma- ja seinämäkontaktit, muotin eroosio…

Jähmettyminen, jäähdytys ja lämpökäsittelyt

- Mikrorakenne ja siitä riippuvat materiaaliominaisuudet
- Jäännösjännitykset

VÄSYMISLUJUUS?

LÄMMÖNJOHTAVUUS?

© WÄRTSILÄ

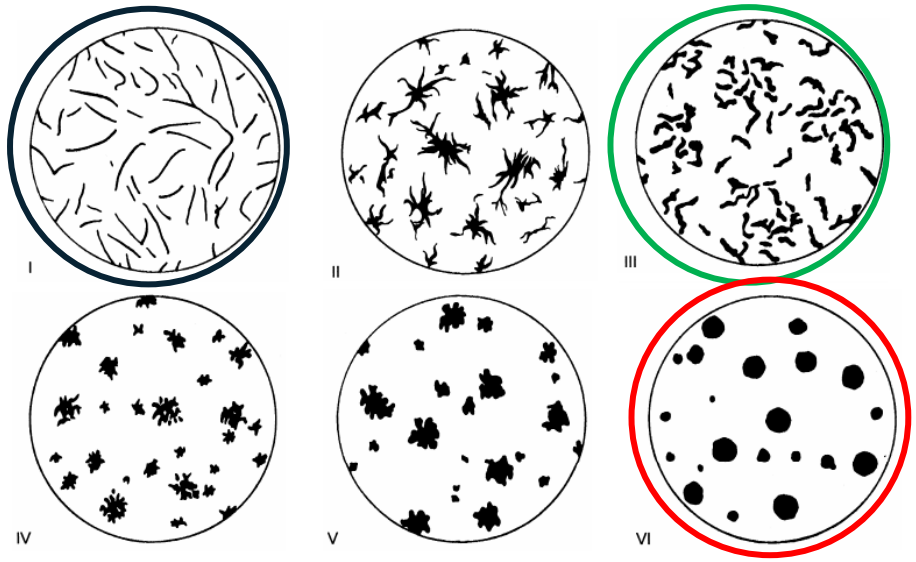
Valuraudat

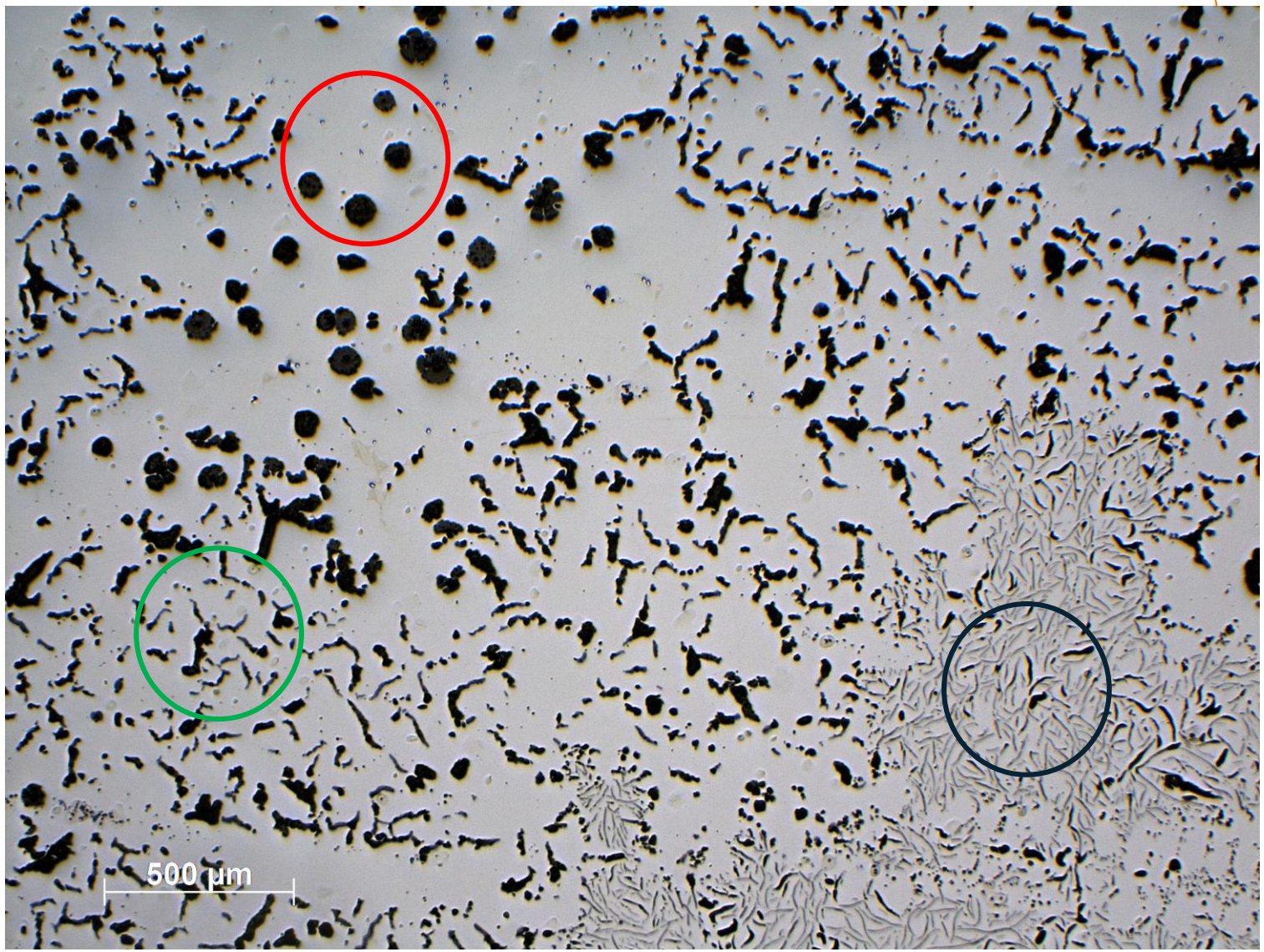
- Teräsmatriisi, jossa on hiilisaostumia:
- Luokittelu grafiitin muodon mukaan

-suomugrafiittivalurauta (GJL), muoto I
Vetolujuus 150–300 MPa
Erittäin hyvä lämmönjohtavuus

-tylppägrafiittivalurauta (GJV), muoto III
Vetolujuus yleensä 300–500 MPa
Hyvä lämmönjohtavuus

-pallografiittivalurauta (GJS), muodot VI ja V
Vetolujuus yleensä 350–700 MPa





Huomautus: kuvan materiaalin pitäisi olla pallografiittivalurautaa, mutta…

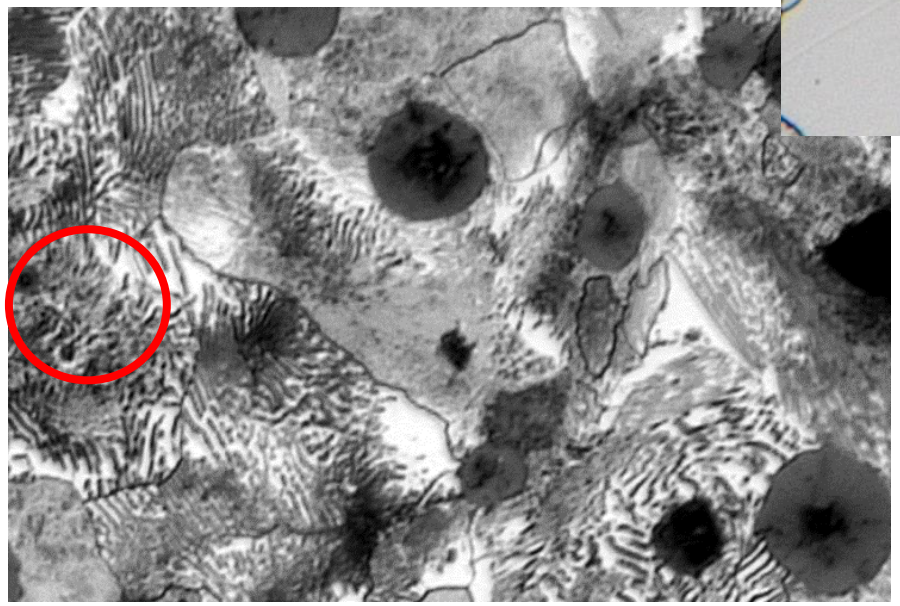
© WÄRTSILÄ

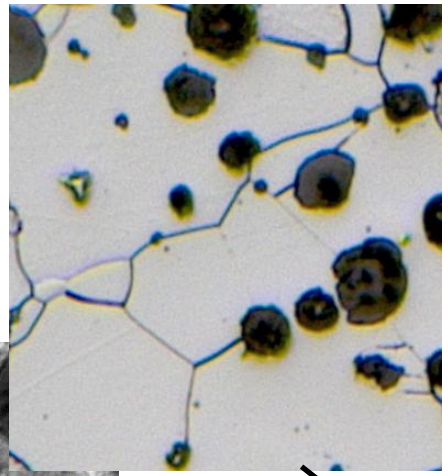
Pallografiittivaluraudat

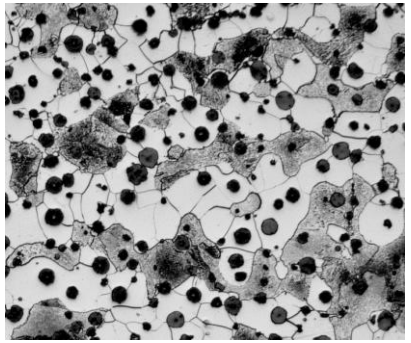
Lujuusominaisuuksiin vaikuttaa erityisesti:

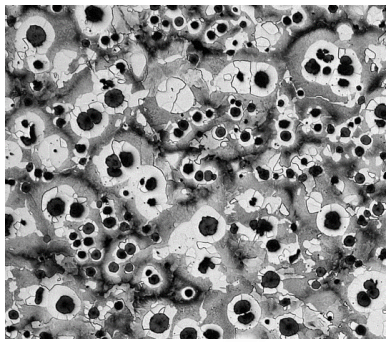
Perliitin osuus

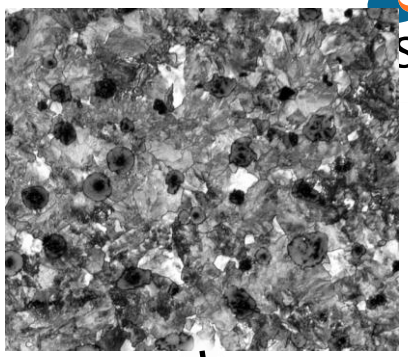
- Perliitti koostuu ferriitistä ja sementiittilamelleista
- Perliitin määrää säädetään seostuksella (Cu, Sn, Mn)

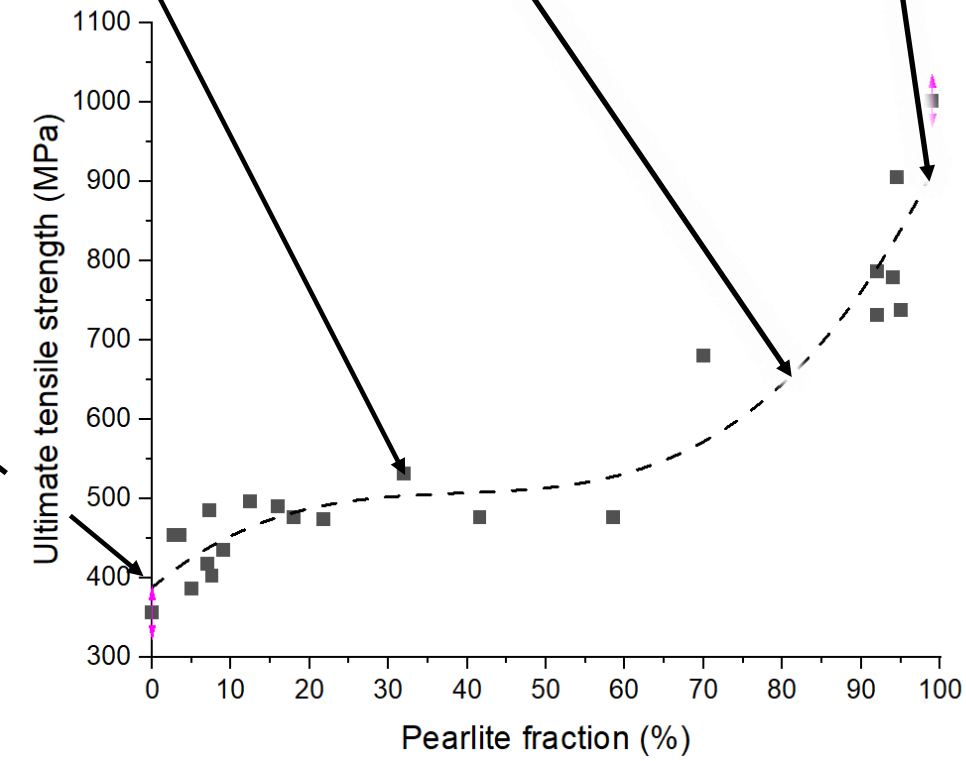










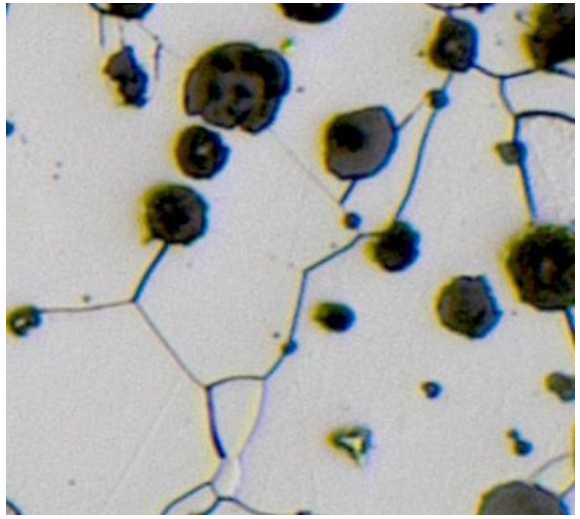


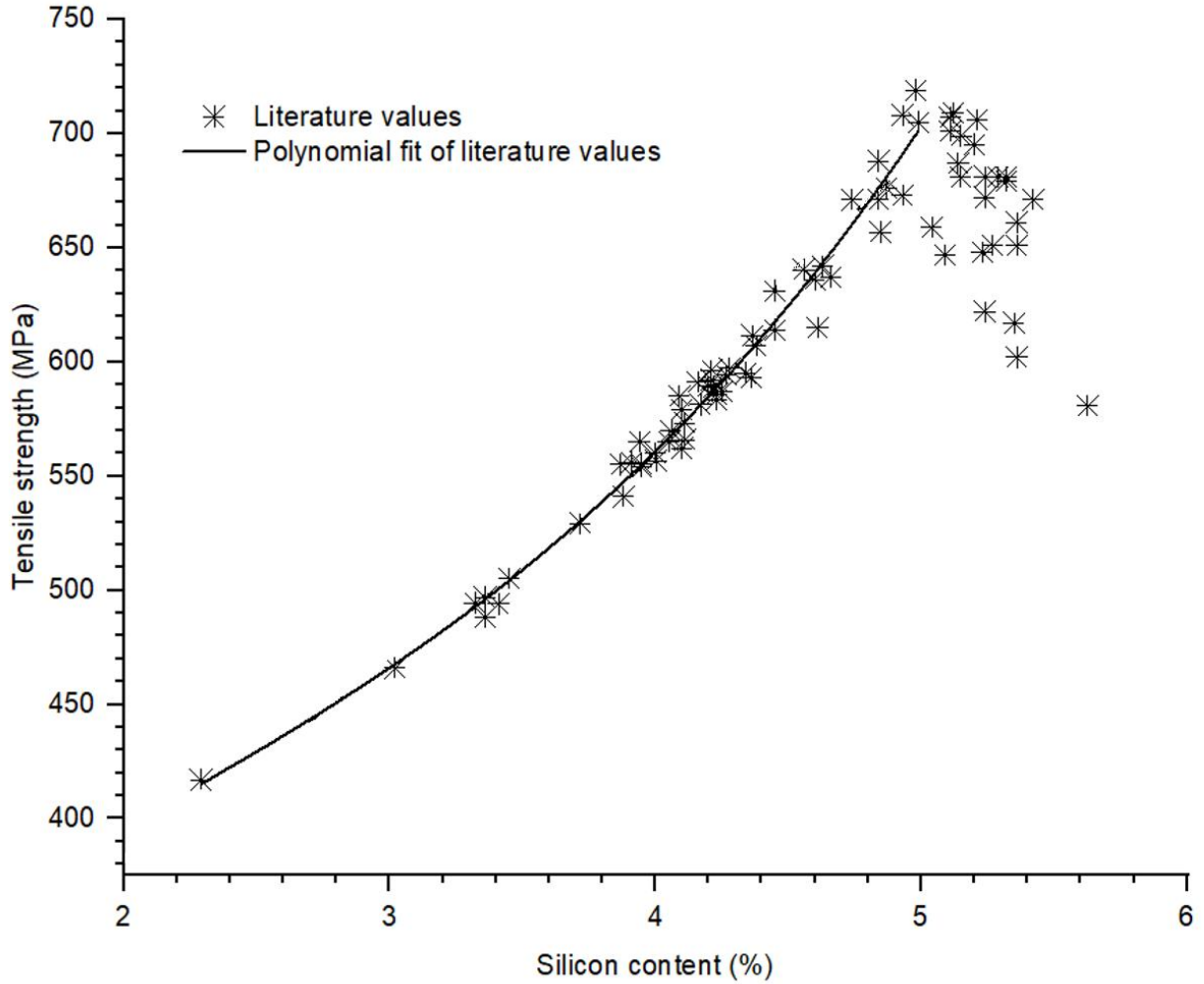
© WÄRTSILÄ

WÄRTSILÄ

Ferriittimatriisi

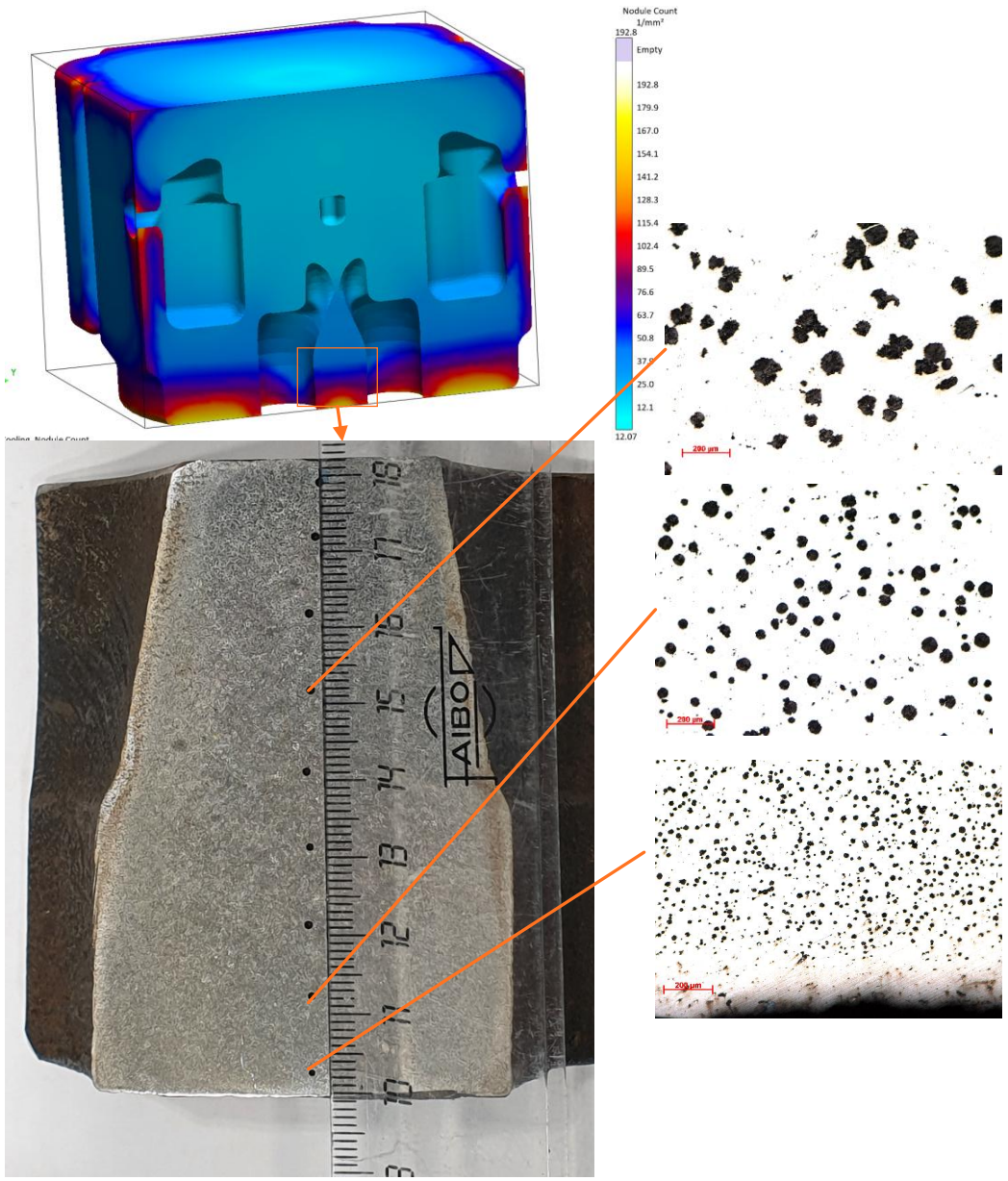
- Seostus piillä
- Lujittaa ferriittiä
- Piipitoisuus jopa 5 %
- Edistää ferriittiä

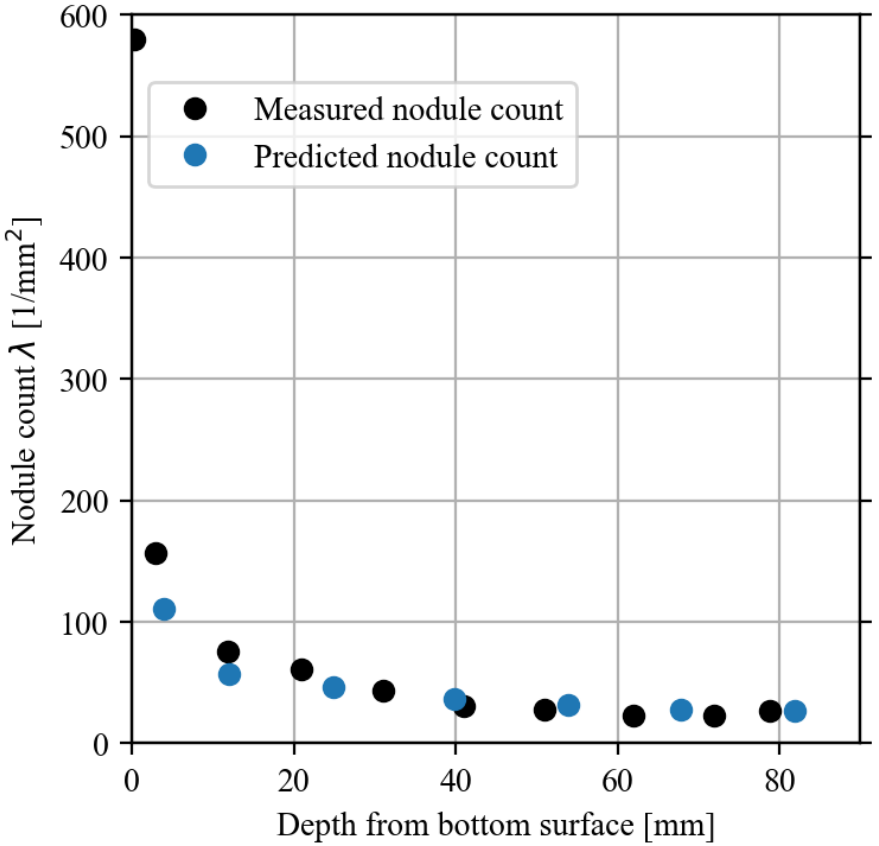




© WÄRTSILÄ

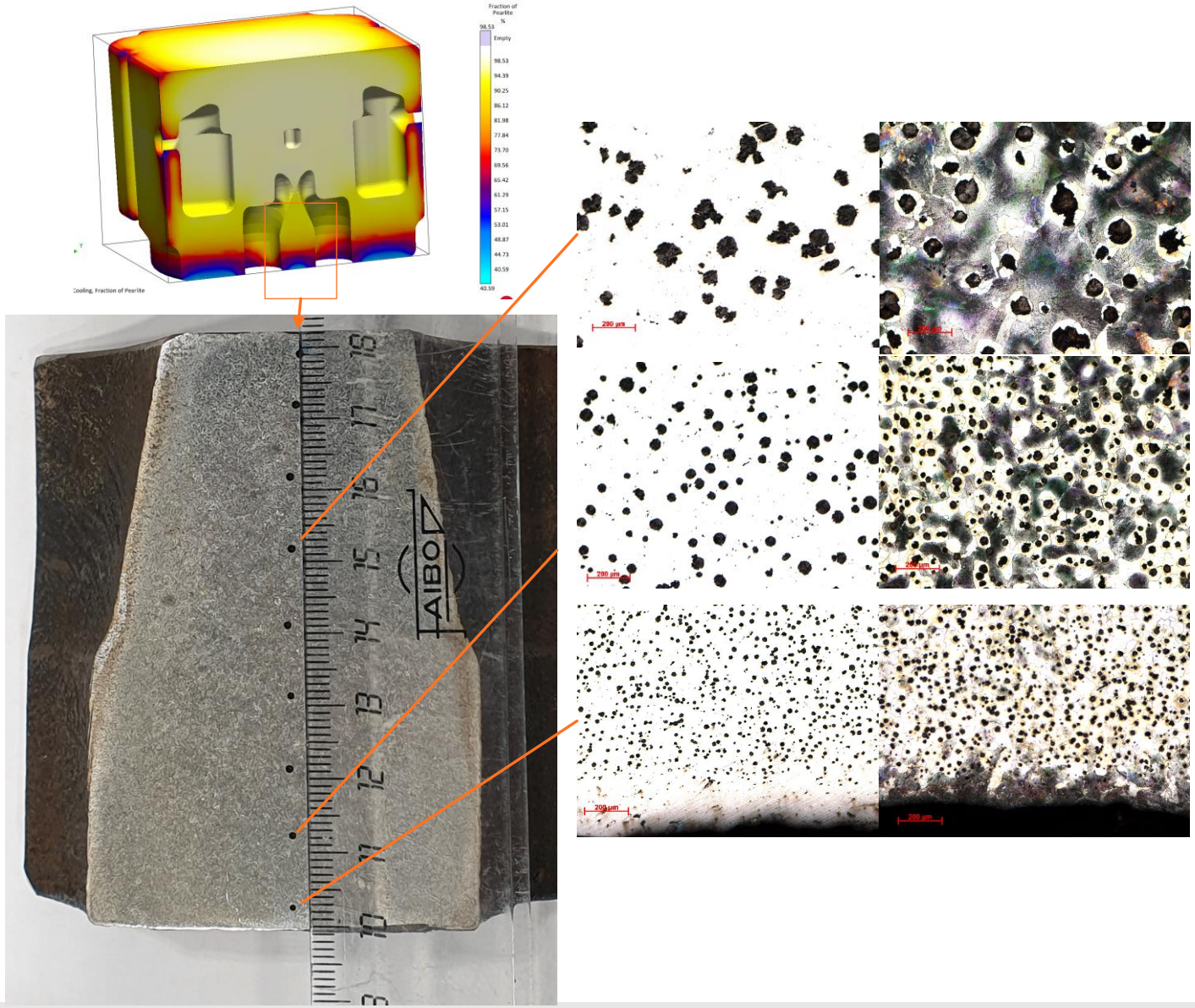
Mikrorakenteen valusimulaatio

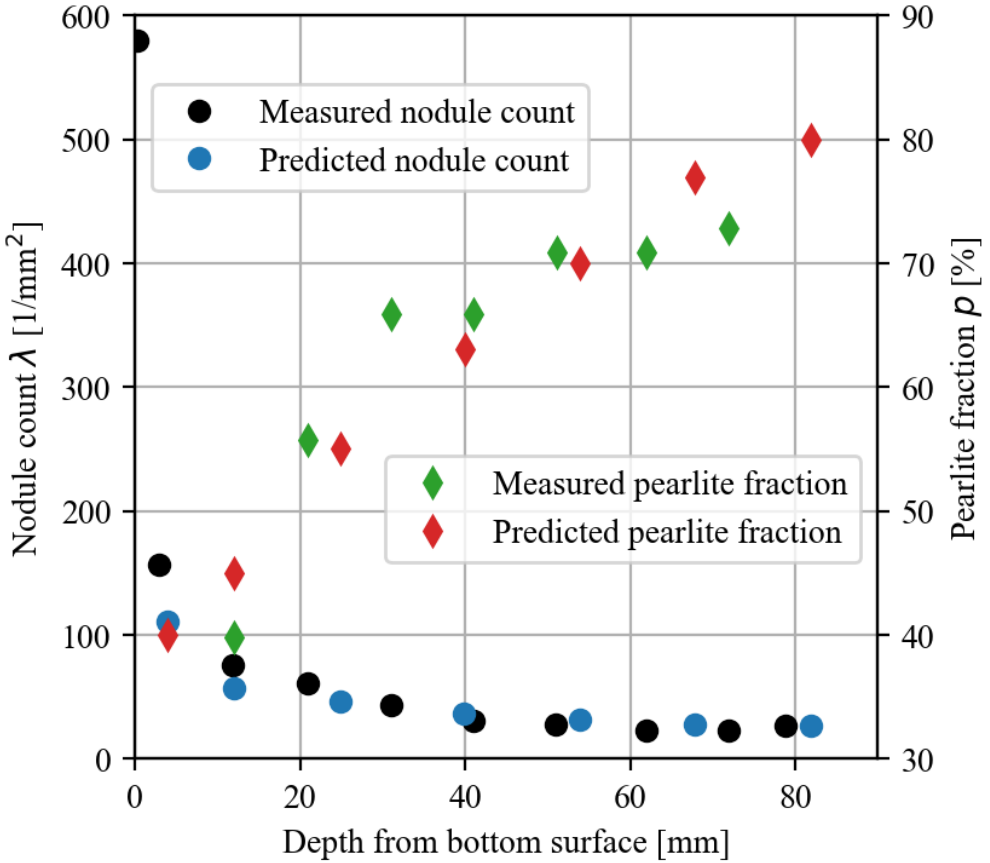




© WÄRTSILÄ

Mikrorakenteen valusimulaatio

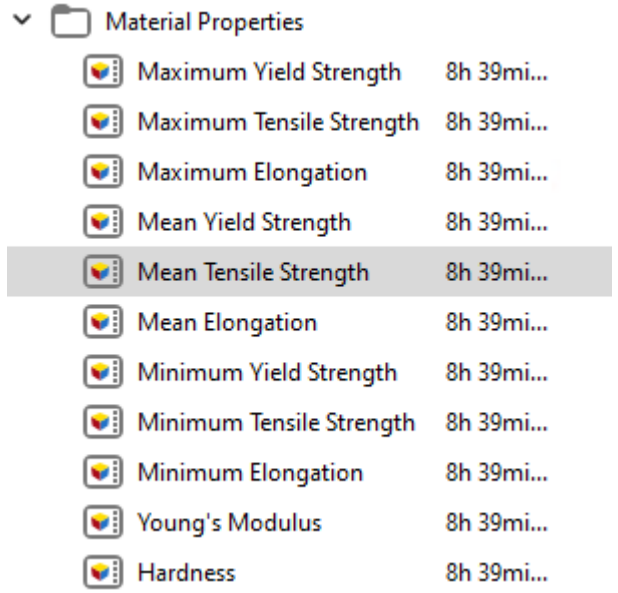


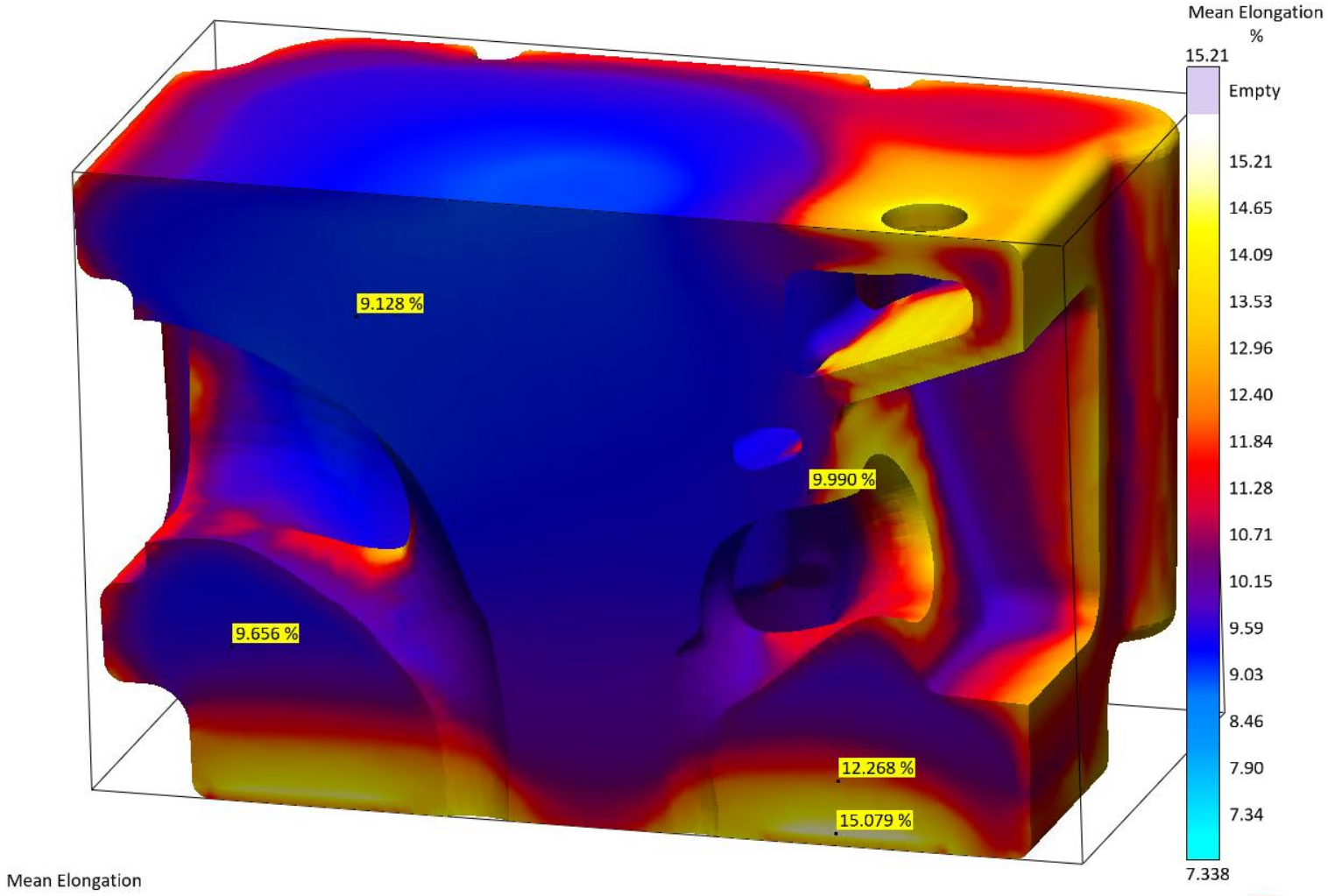


© WÄRTSILÄ

Mekaaniset ominaisuudet

Valusimulaatio-ohjelmisto voi ennustaa paikallisia materiaalin ominaisuuksia mikrorakenteen perusteella



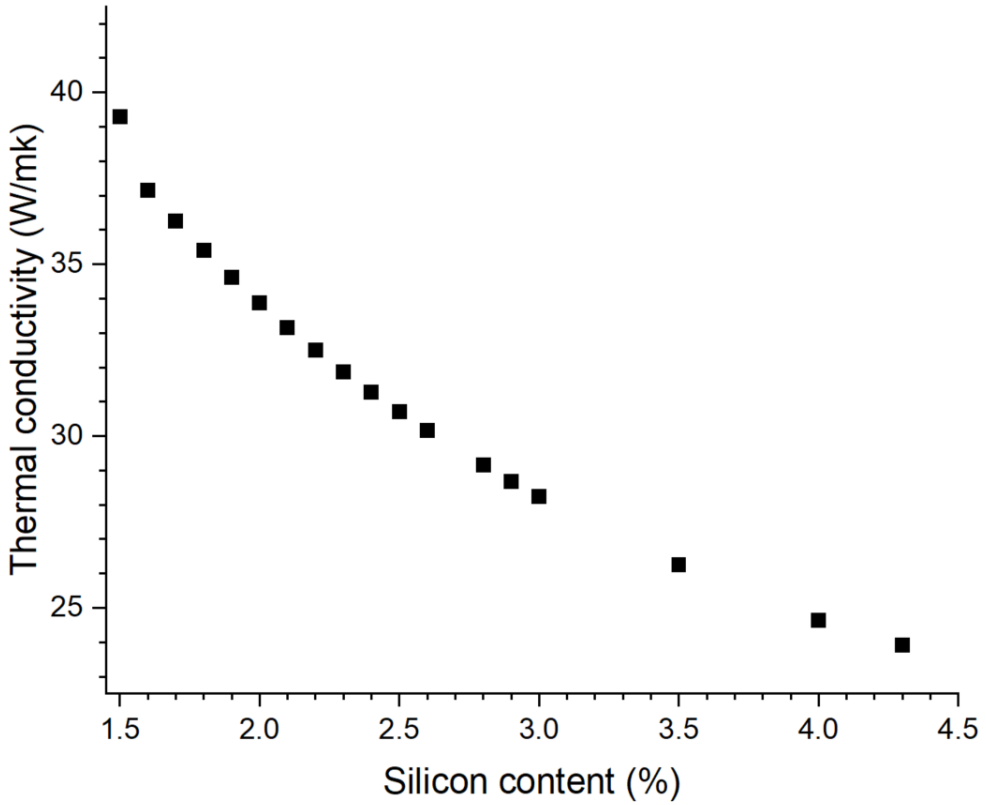


Huomautus: Komponentti on vain materiaalitutkimuksia varten. Se ei ole eikä tule tuotantokäyttöön.

© WÄRTSILÄ

Lämpöominaisuuksien simulointi

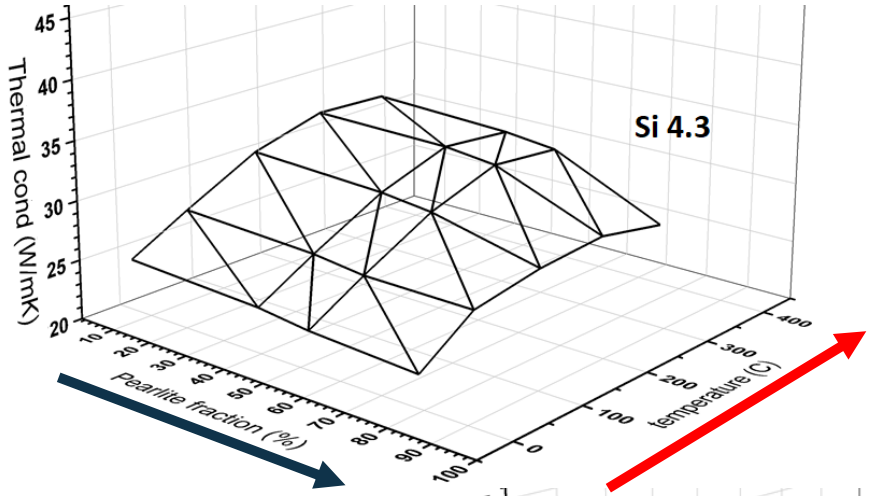
- Pallografiittivaluraudan lämmönjohtavuuteen vaikuttavat:
  - Perliitin ja ferriitin osuudet
  - Piipitoisuus (ferriitti)

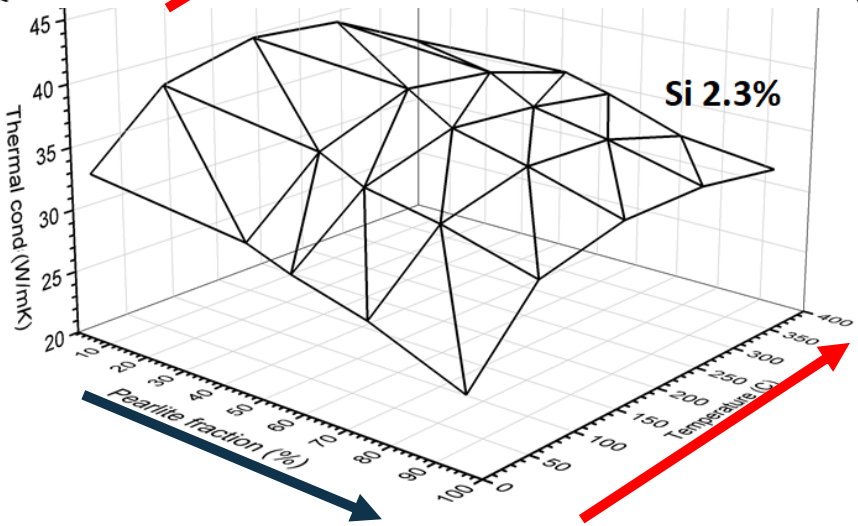


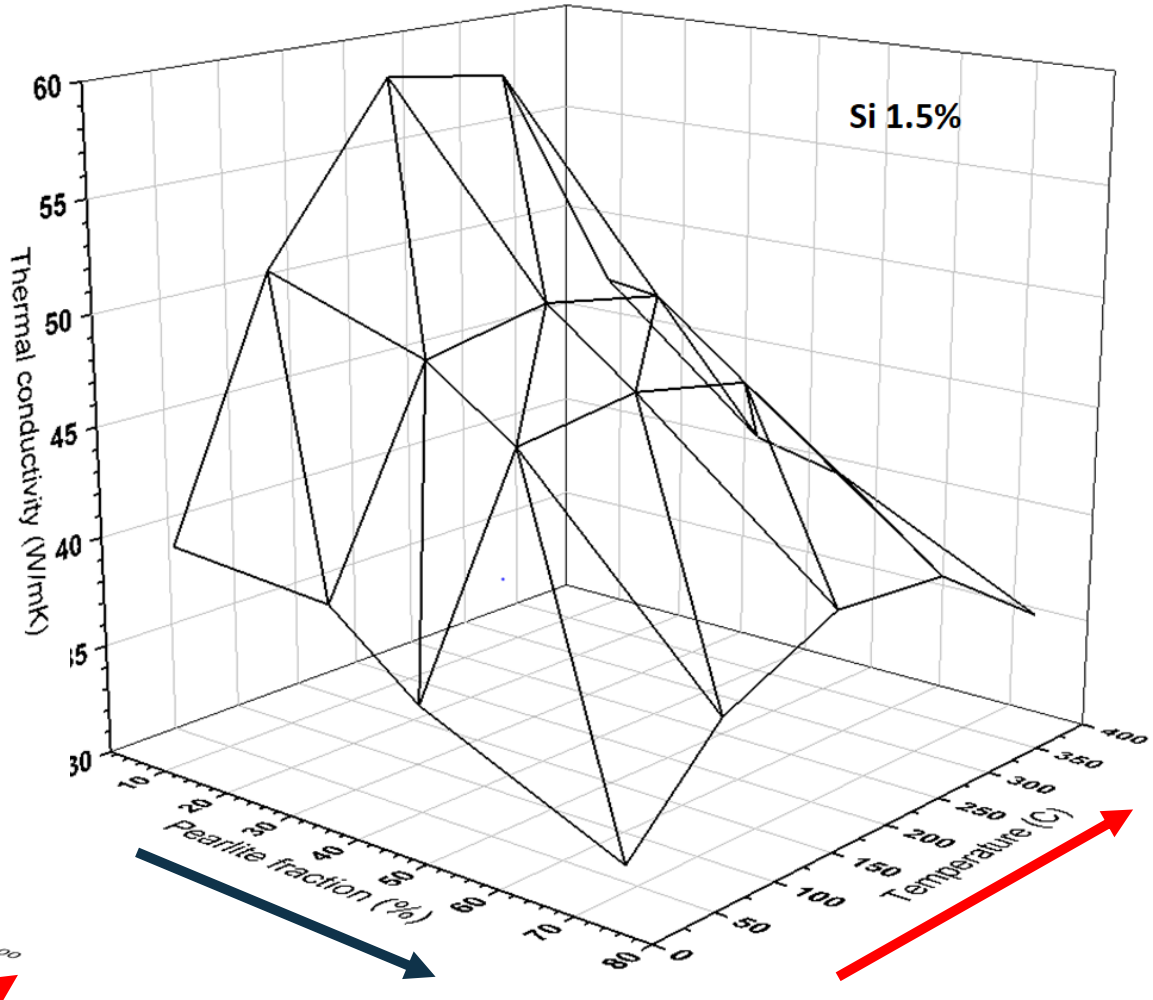
Piin vaikutus täysin ferriittisen pallografiittivaluraudan lämmönjohtavuuteen. Hiiliekvivalentti 4,3 %. ($C_e = C(\%) + \frac{1}{3}(Si(\%) + P(\%))$

© WÄRTSILÄ

Lämmönjohtavuus: perliitin osuuden vaikutus

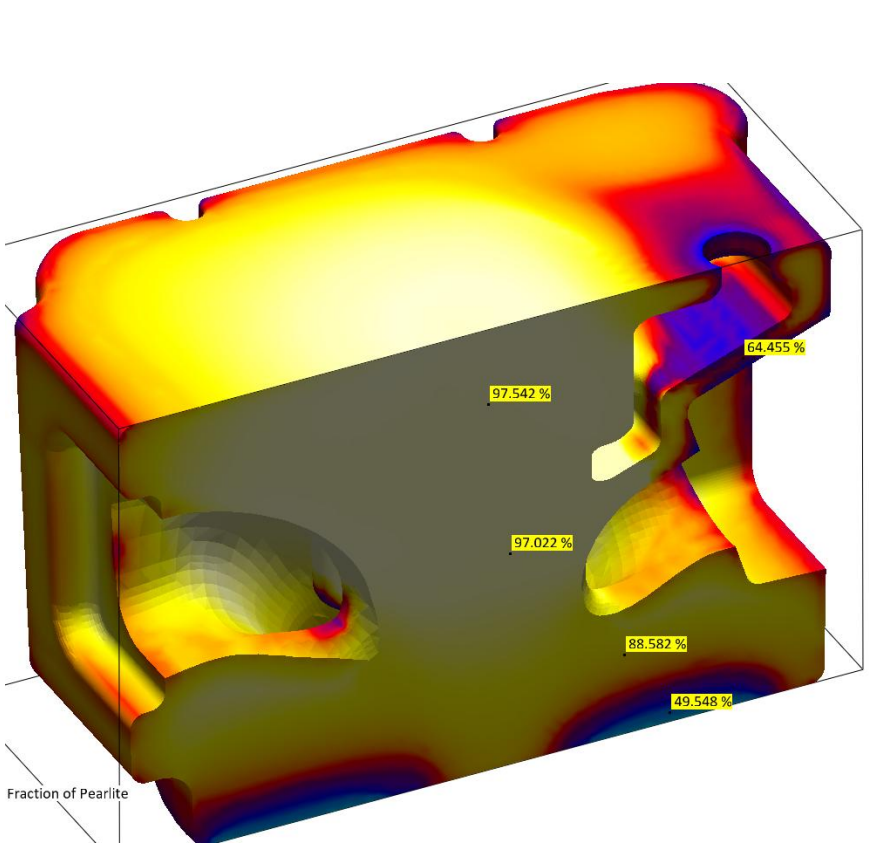


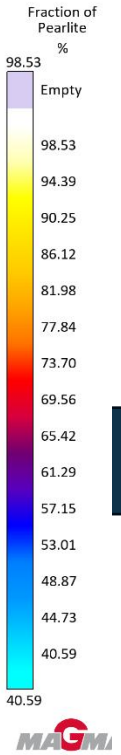


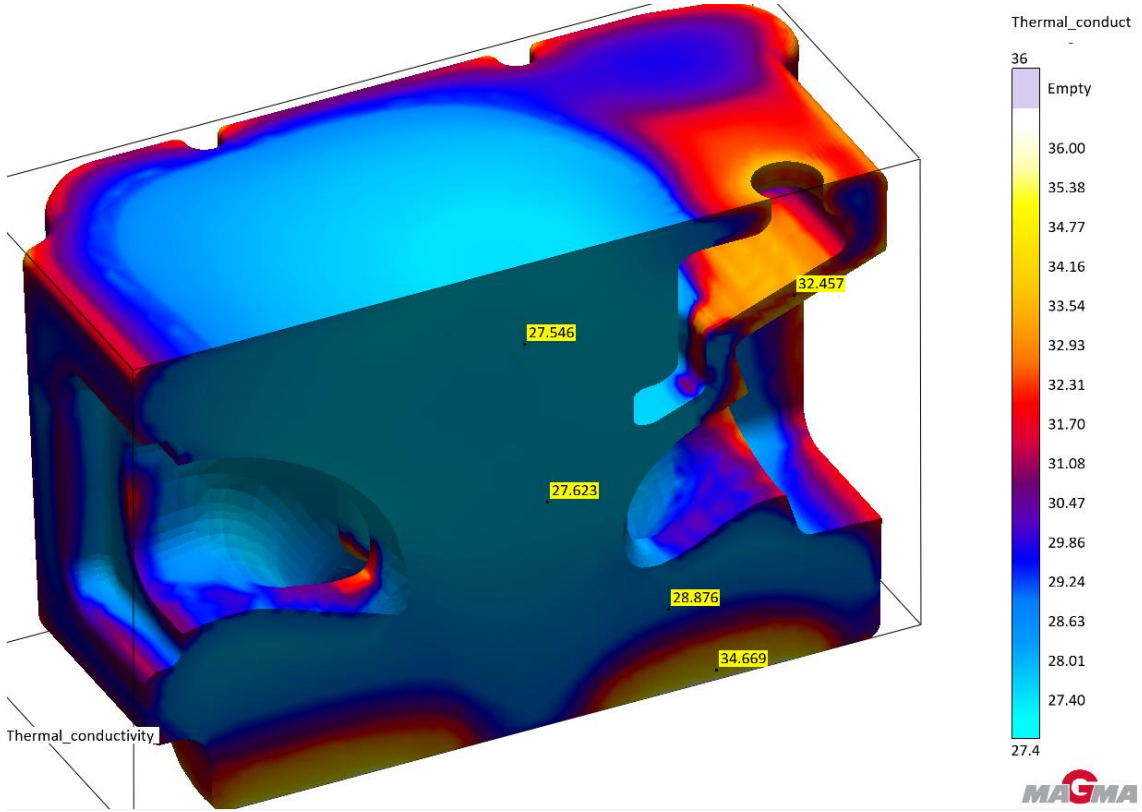


© WÄRTSILÄ

Lämmönjohtavuuden simulointi







+ piipitoisuus

Huomautus: Komponentti on vain materiaalitutkimuksia varten. Se ei ole eikä tule tuotantokäyttöön.

© WÄRTSILÄ

Mikrorakenteeseen perustuva väsyminen

Murakami ja Endo ovat kehittäneet pallografiittivaluraudalle √area-mallin.

$$\sigma_{w,gf,loc} = F_{loc} \frac{(HV_m + 120)}{(\sqrt{area_{gmax}})^{1/6}}$$

F_{loc} = vakio (1,56 sisäiselle vialle, 1,43 pintavialle)
HV_m = ympäröivän matriisin Vickers-kovuus
$\sqrt{area_{max}}$ = vian koko



© WÄRTSILÄ

Murakami-Endo model

"classic Murakami model

$$\sigma_w = F_{loc}\frac{(HV+120)}{\sqrt{\text{area}}^{1/6}},$$ where

σ_w is fatigue limit in R=-1 amplitude

F_{loc} is correction factor depending on location;

1.43 for surface defect and

1.56 for internal defects.

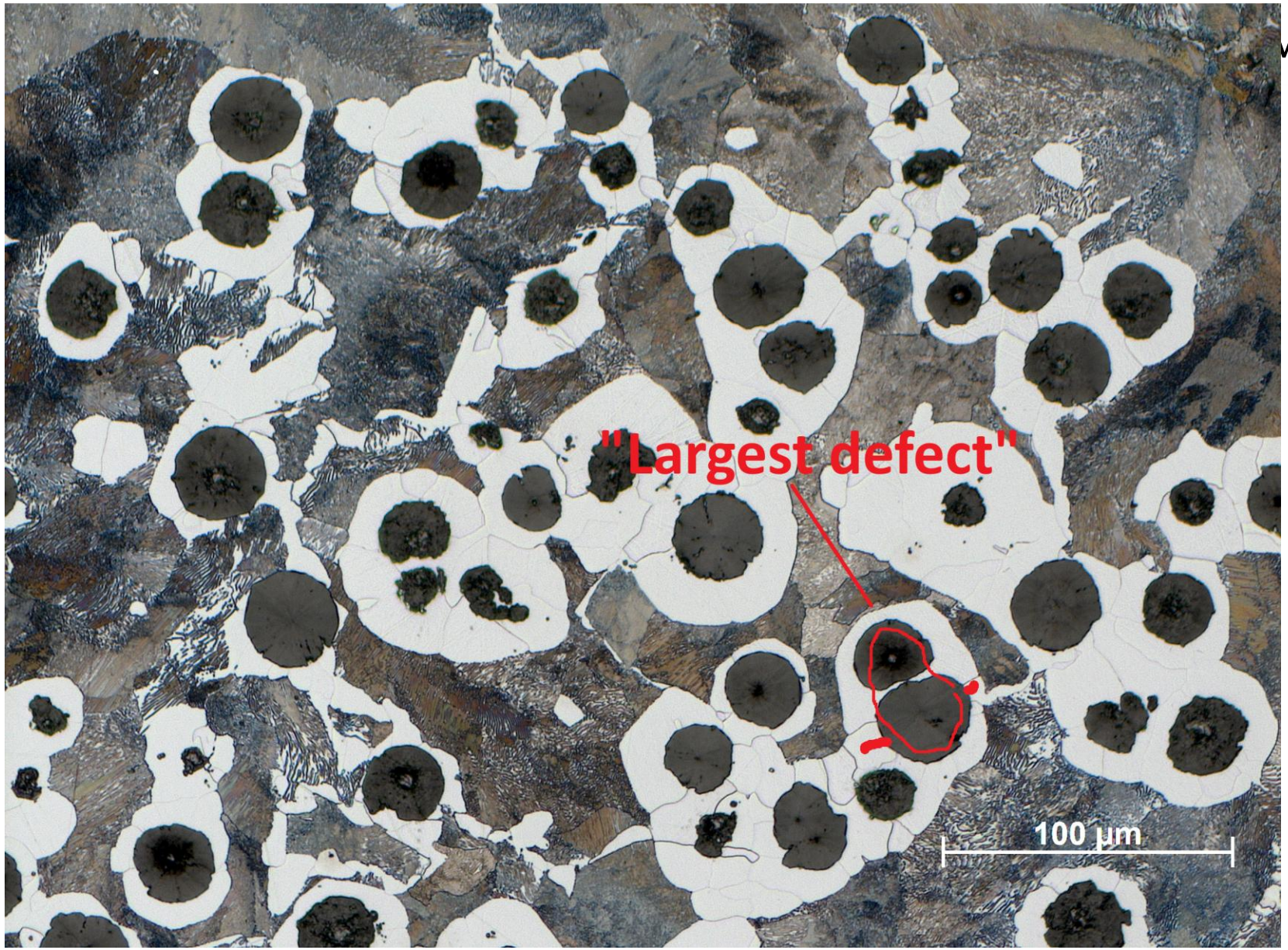
HV is matrix hardness around defect

$\sqrt{\text{area}}$ is size of defect in µm.



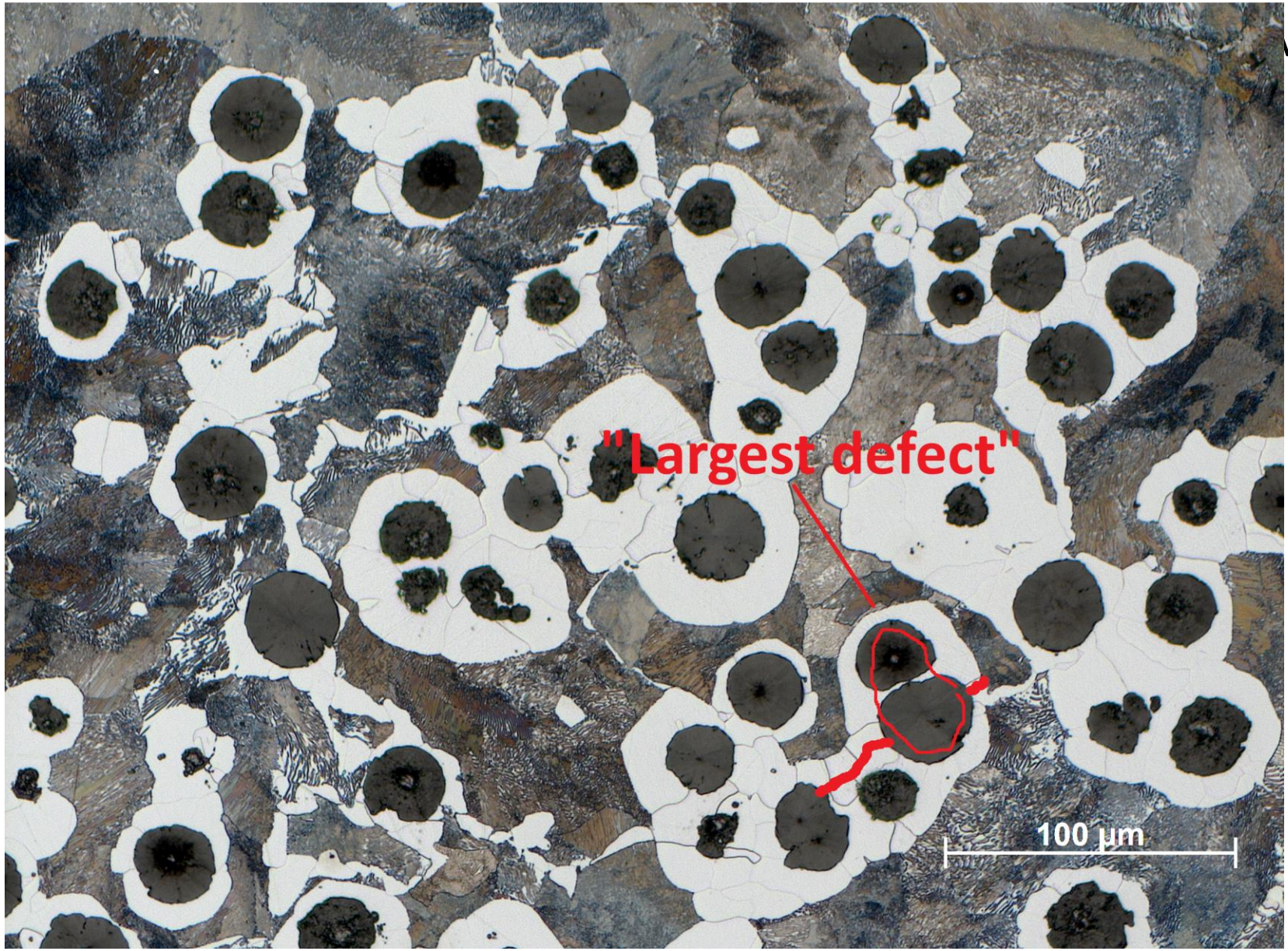
© WÄRTSILÄ

Murakami-Endo malli
Ydintyminen ferriitissä



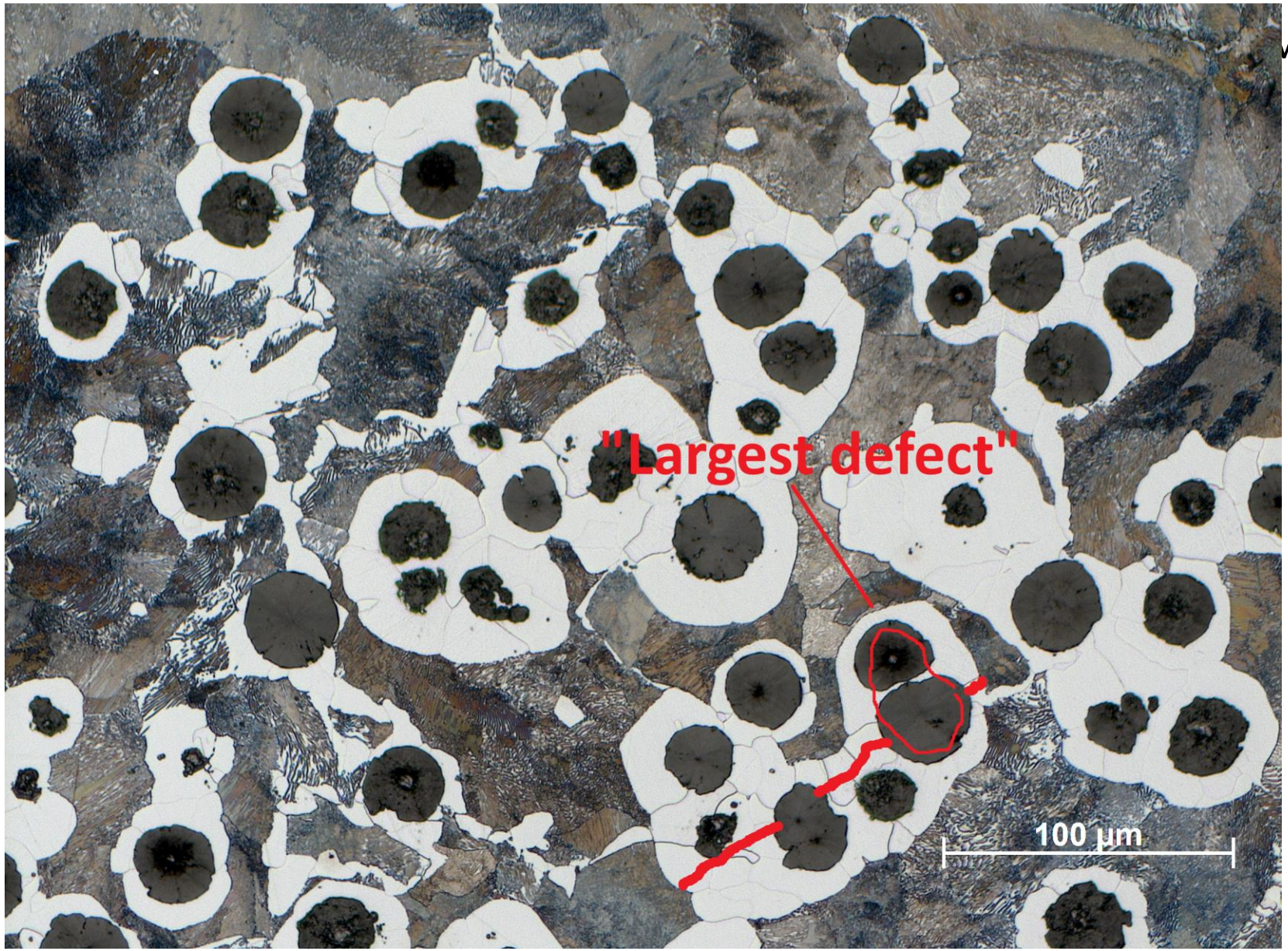
© WÄRTSILÄ

Murakami-Endo model



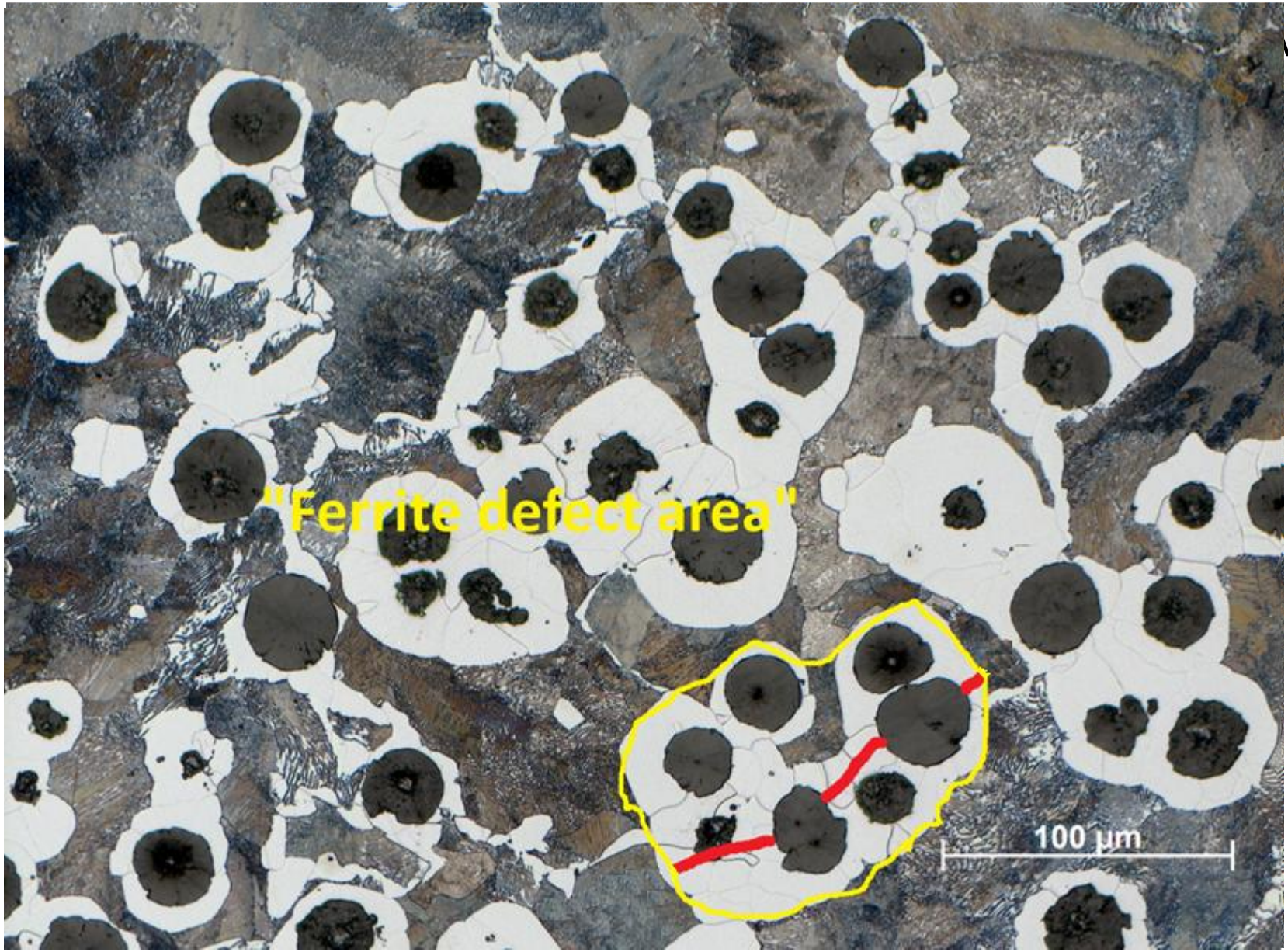
© WÄRTSILÄ

Murakami-Endo model



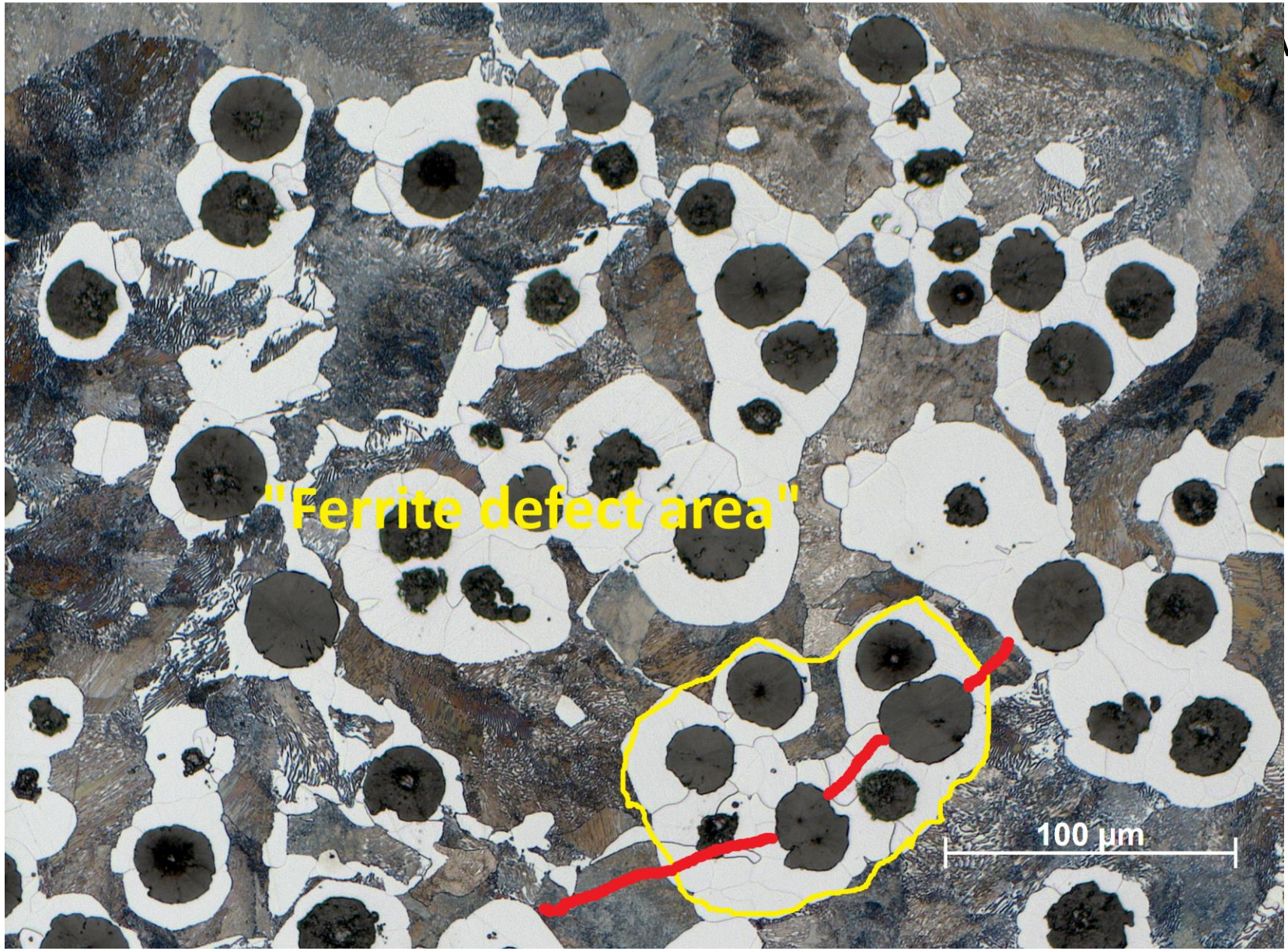
© WÄRTSILÄ

Murakami-Endo model



© WÄRTSILÄ

Murakami-Endo model



© WÄRTSILÄ

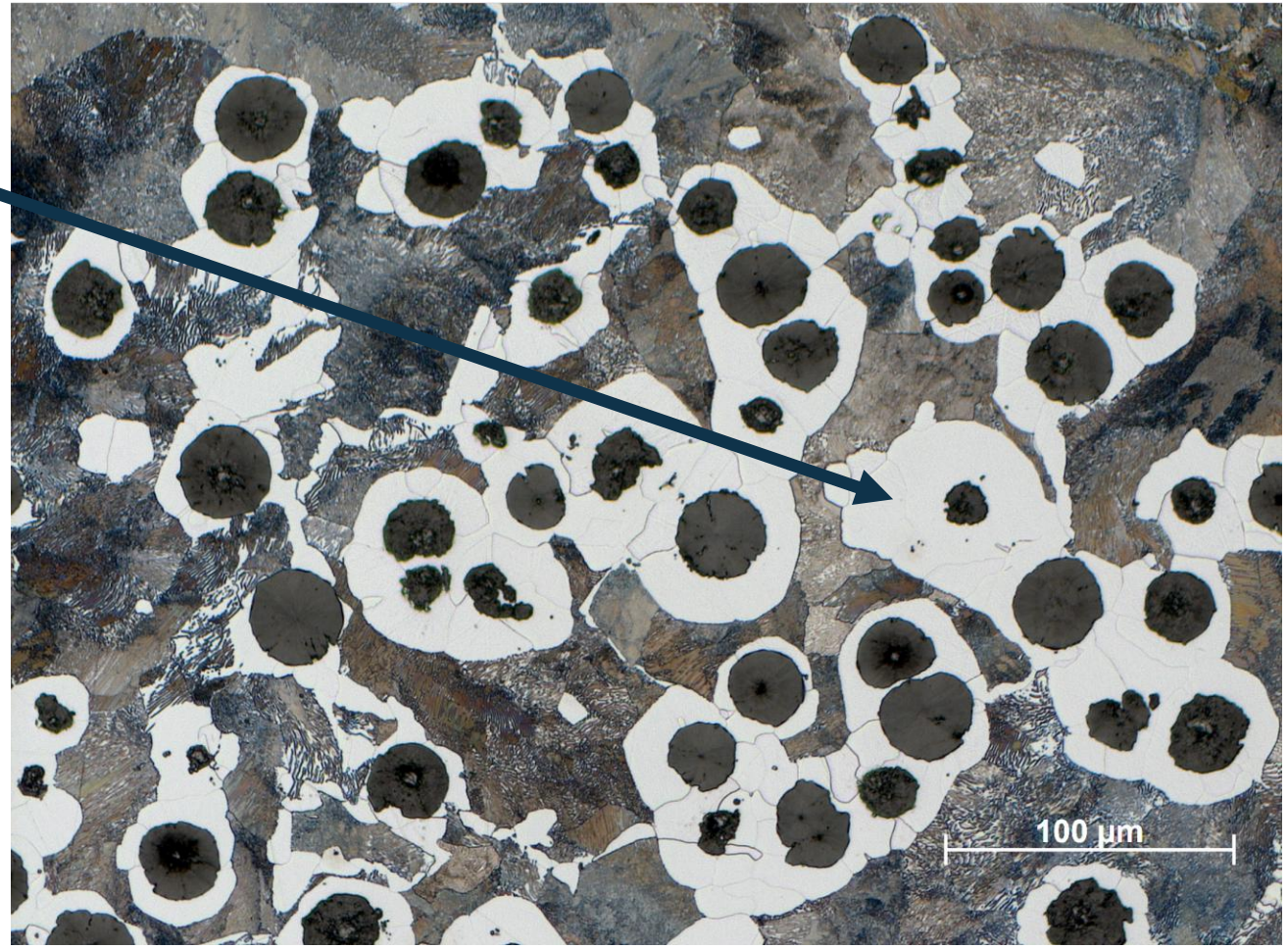
Parametrien määritys ferriittialueella

$$\sigma_{wferrite} = F_{loc}\frac{(HV_{ferrite} + 120)}{\sqrt{area_{def}}^{1/6}}$$

missä

$HV_{ferrite}$

Ferriittikovuus voidaan arvioida piipitoisuuden perusteella:
HV_{fe}=1.31*61.63*Si(%)+25
Missä Si(%) on piipitoisuus
1.31 on kerroin makrokovuudesta mikrokovuuteen pallografiitti valuraudoissa (Endo).

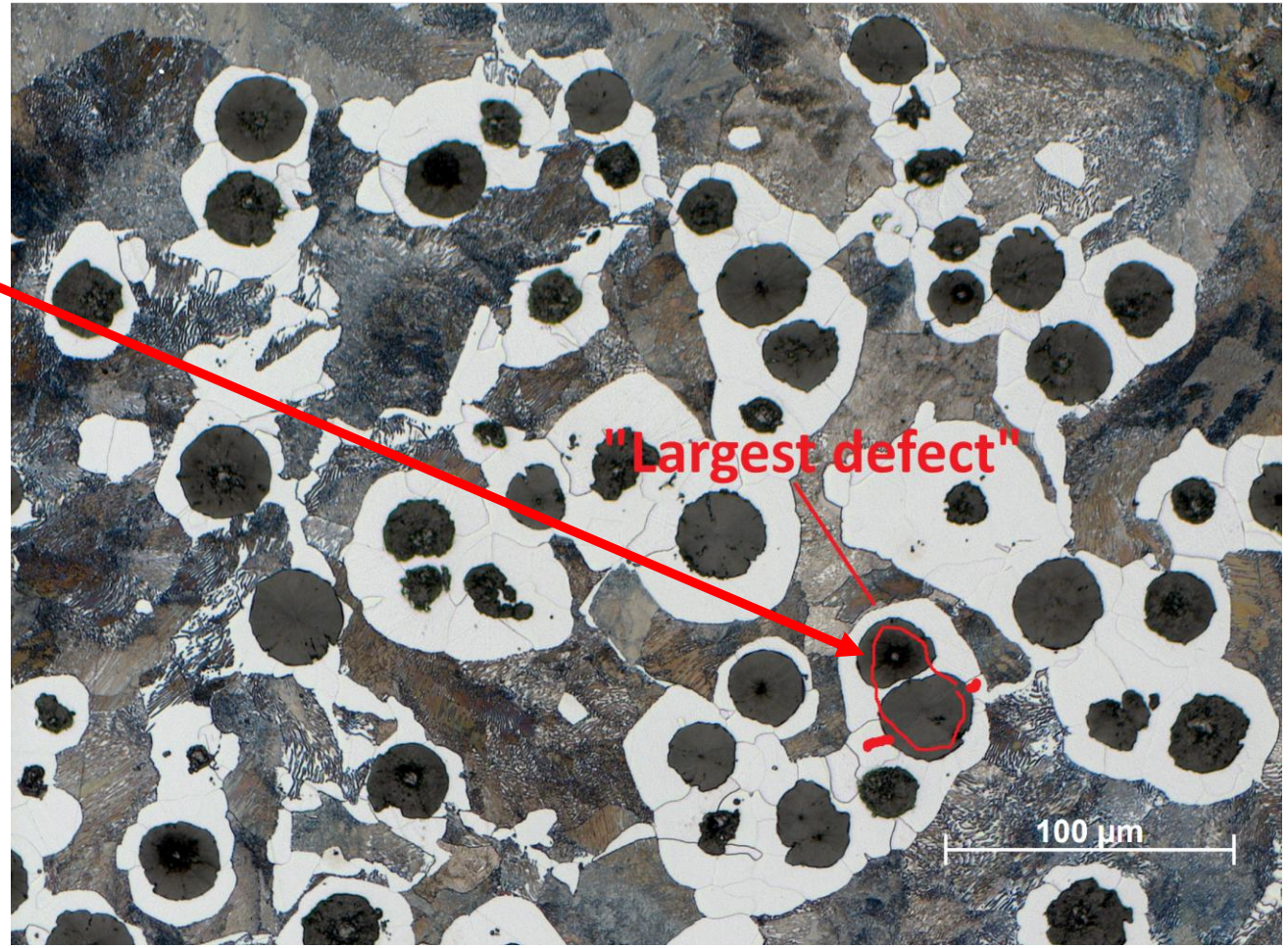


© WÄRTSILÄ

Parameter determination in

$$\sigma_{wferrite} = F_{loc} \frac{(HV_{ferrite} + 120)}{\sqrt{area_{def}}^{1/6}}$$

Borsato et.al. 2018 found correlation between defect size and nodule count.



© WÄRTSILÄ

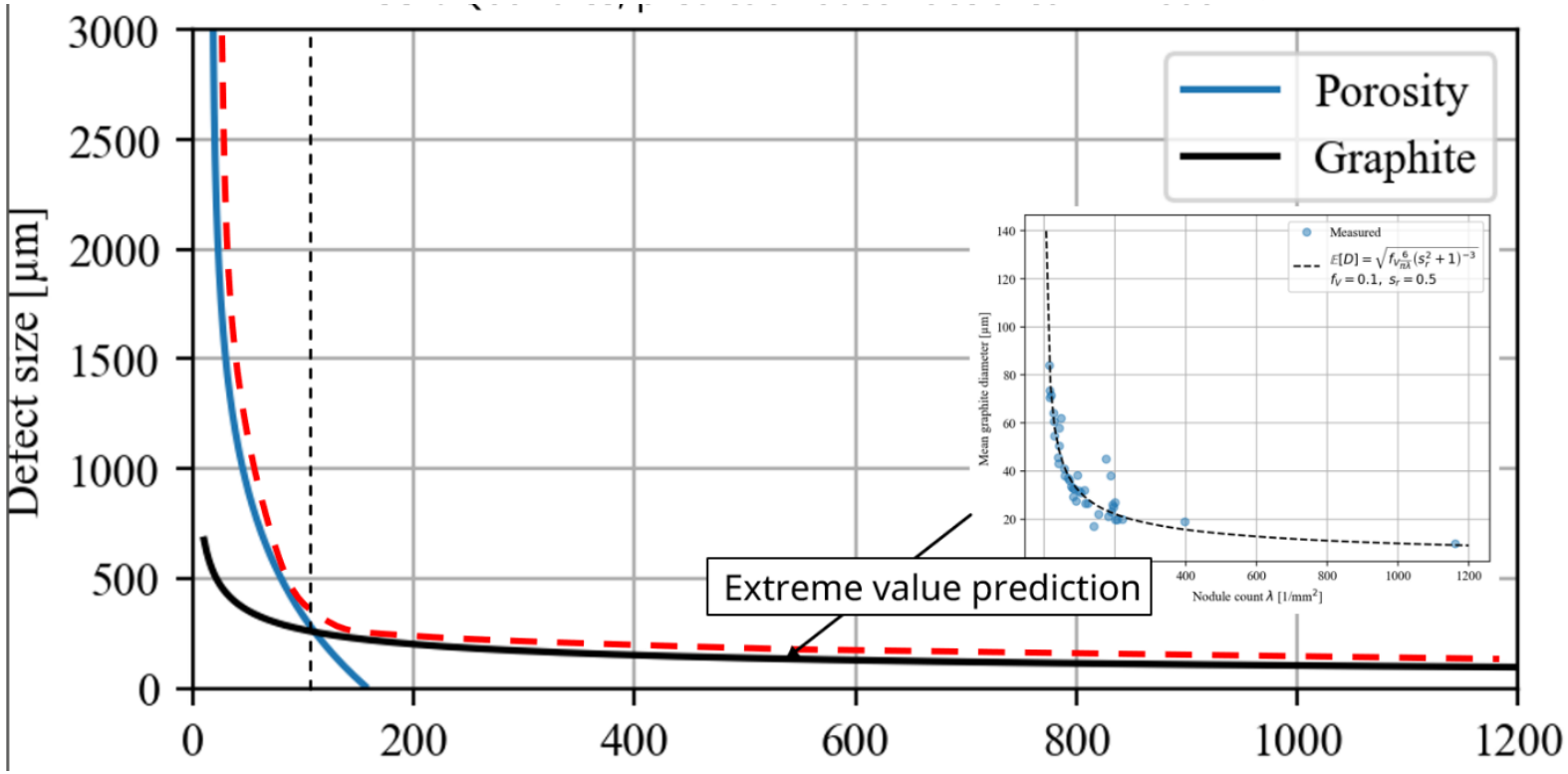
Parametrien määritys

Vikakoko

Tässä esityksessä vikoja ovat joko kaasu- tai mikrokutistumat, grafiittipallojen tai niiden klusterit. Borsato et.al. ovat löytäneet korrelaation grafiittipallojen määrän λ ja vikakoon välillä.

Suurin vika voidaan määritellä

$$\sqrt{area_{def}} = \max(\sqrt{area_{nod}}; \sqrt{area_{gas}})$$



© WÄRTSILÄ

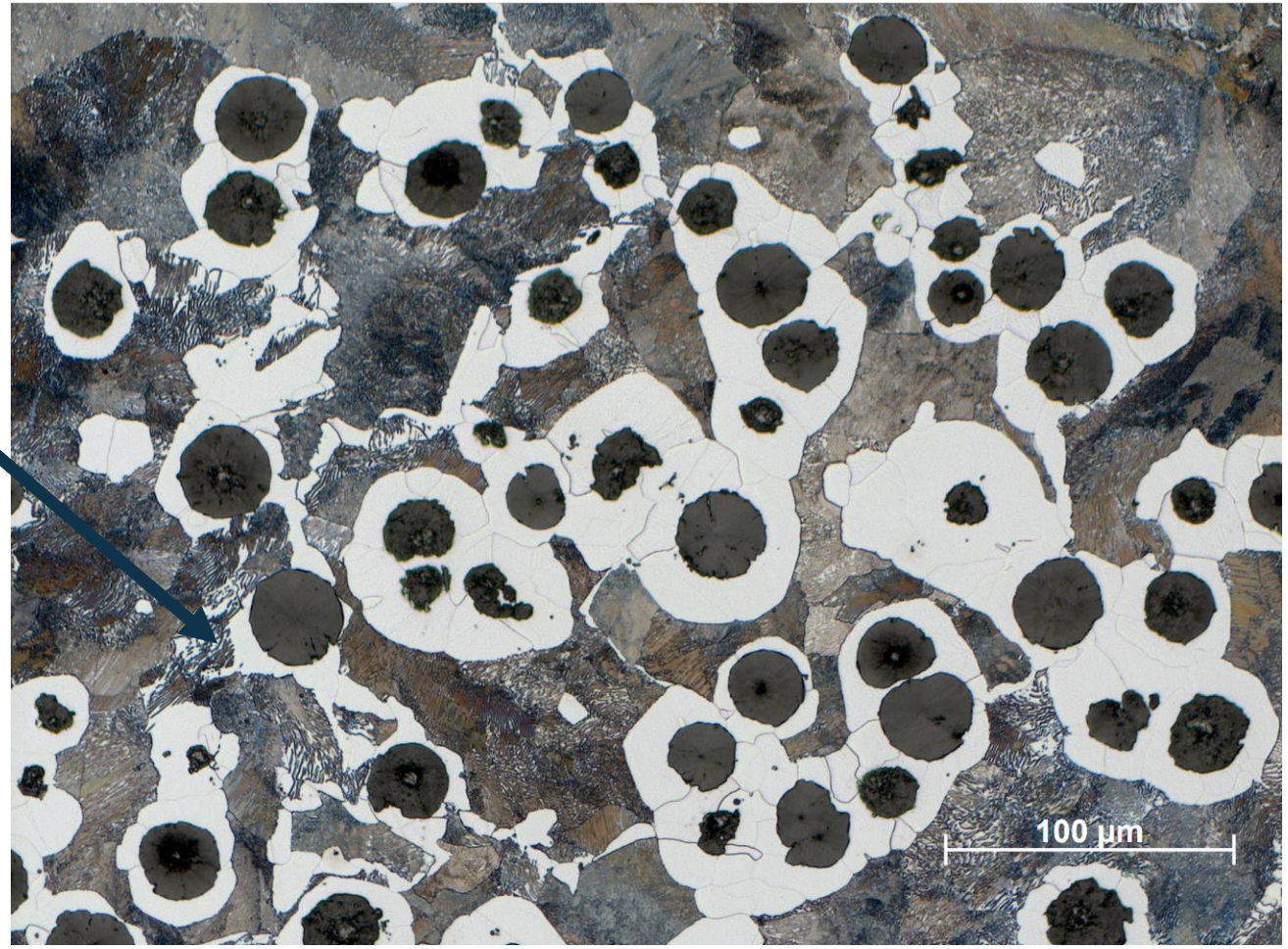
Parametrien määritys perliitti

$$\sigma_{wpearlite} = F_{loc} \frac{(HV_{pearlite}+120)}{\sqrt{area_{ferrite}}^{1/6}},$$

missä

$HV_{pearlite}$

Perliitti koostuu sementtilameleista ferriittimatriisissa. Lamellien koko ja tiheys riippuen kemiallisesta koostumuksesta jähmettymis- ja jäähtymisnopeudesta. Siksi sen arvioidaan olevan 280 HV verrattuna kirjallisuusarvoihin.
Magmasoft ennustaa perliitin kovuusarvot.



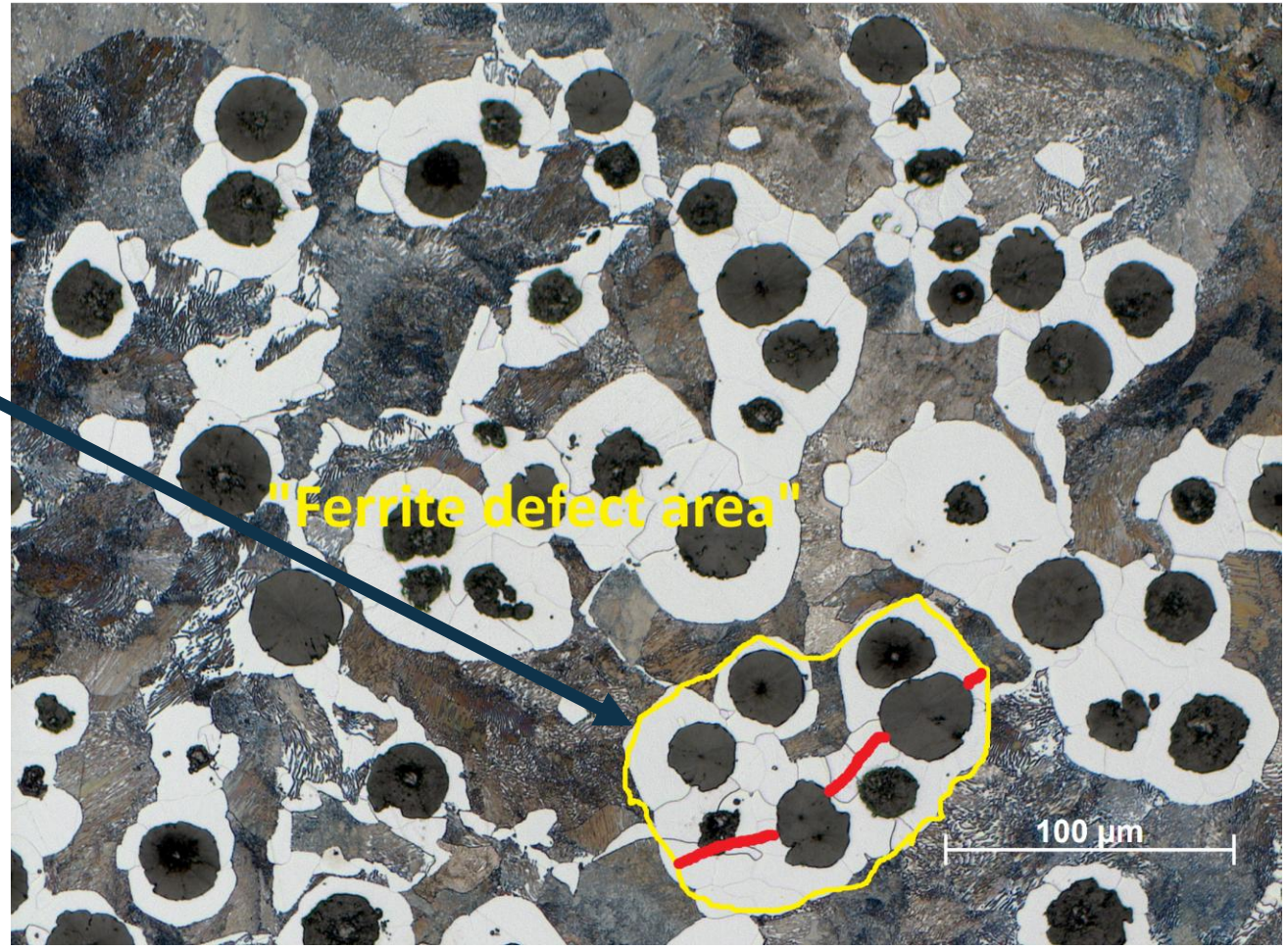
© WÄRTSILÄ

Murakami-Endo-malli

$$\sigma_{wpearlite} = F_{loc} \frac{(HV_{pearlite}+120)}{\sqrt{area_{ferrite}}^{1/6}},$$

missä

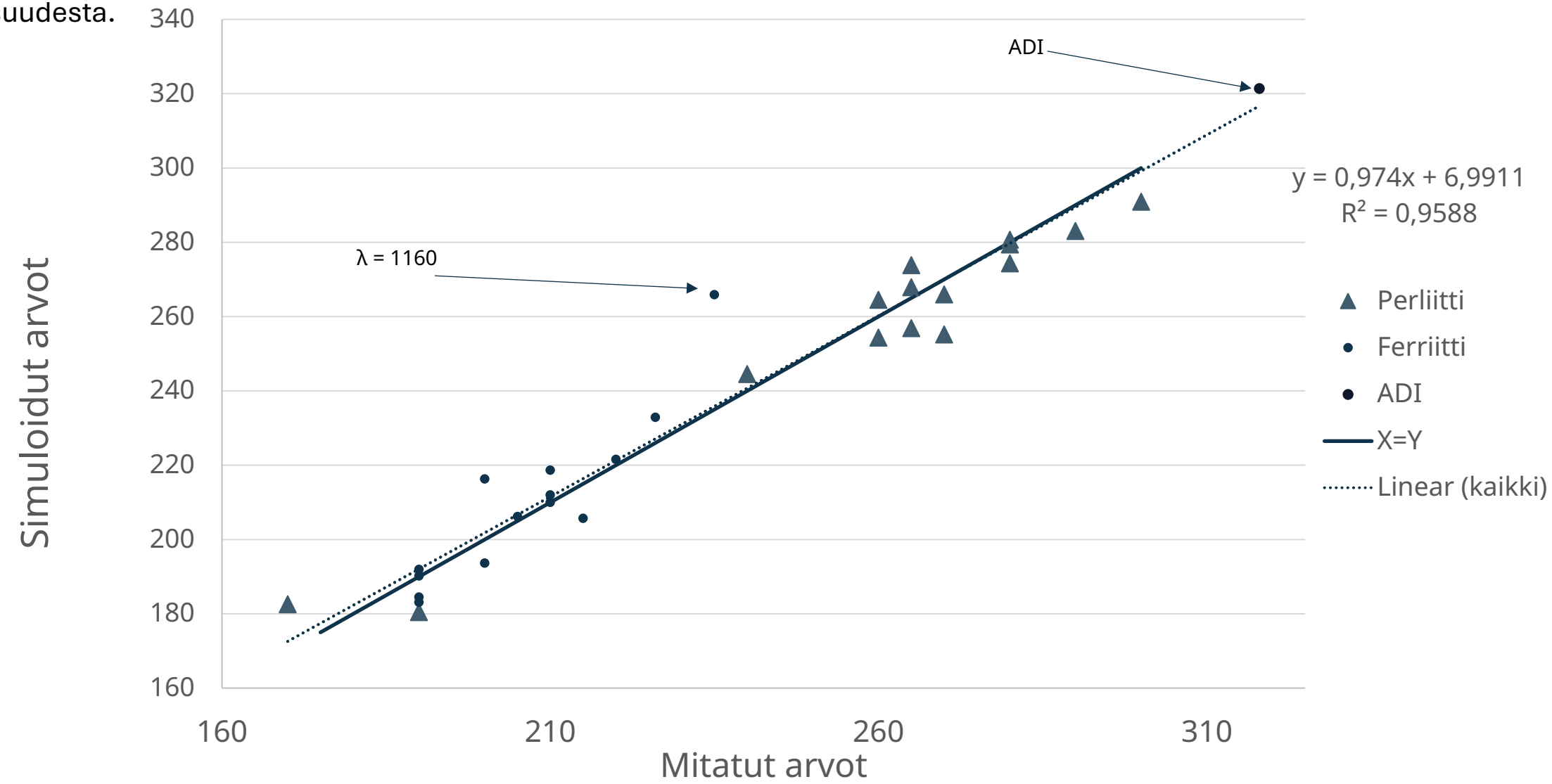
.



© WÄRTSILÄ

Väsymislujuuden validointi

Vertailu mitattuihin arvoihin, jotka on kerätty kirjallisuudesta.



© WÄRTSILÄ

Casting simulation fatigue model vs. measurements

Rabb&Marques 1999

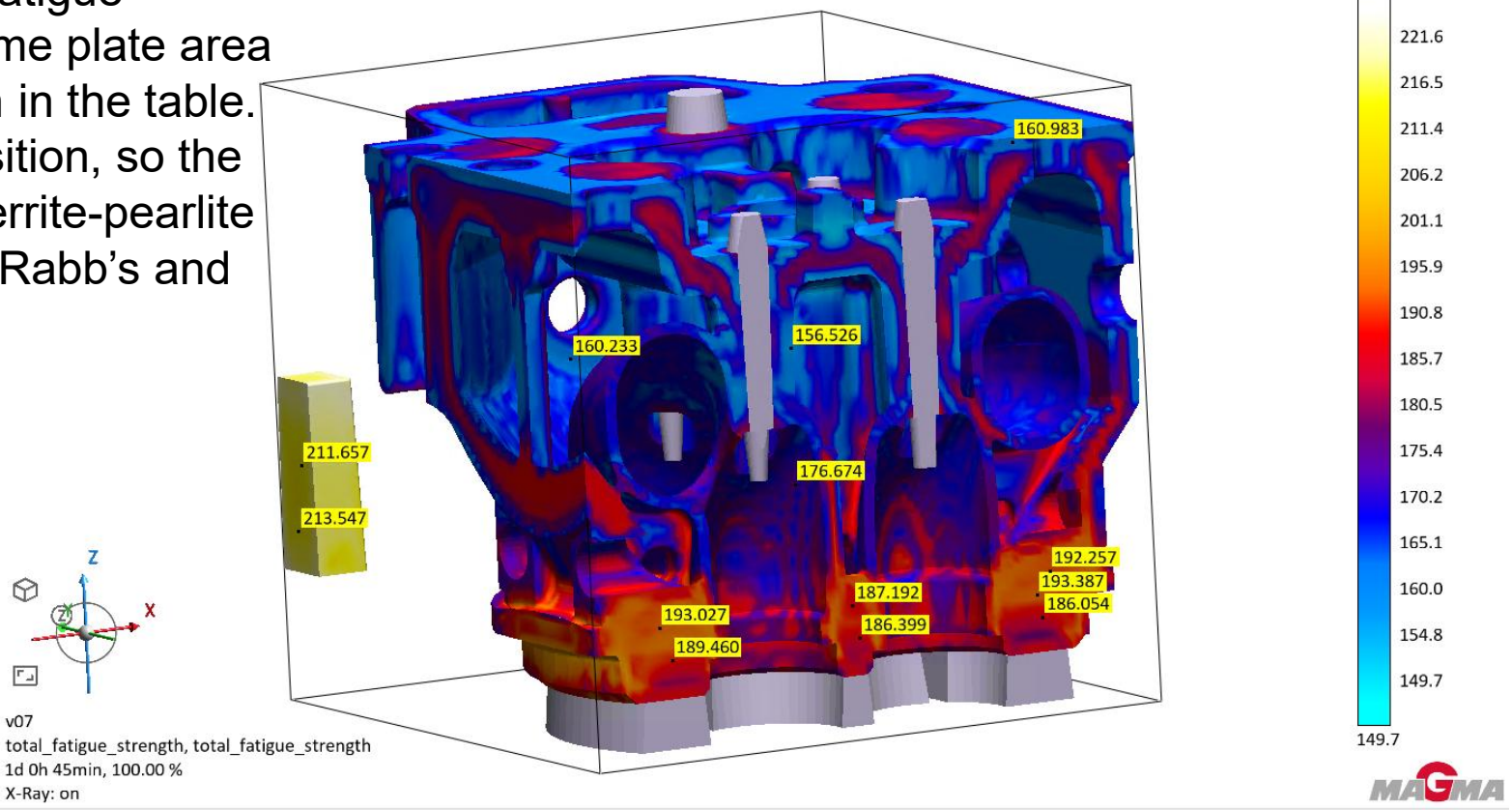
Roger Rabb and Gary Marques studied fatigue properties of the W64 cylinder head's flame plate area and separate test bar. Results are shown in the table. They did not define the chemical composition, so the educated guess was fine-tuned so that ferrite-pearlite structure in the simulation was similar to Rabb's and Marques' tests.

-Fatigue results were well inline.

experimentally measured values obtained from Marquis et al. 1998.

		Batch 1	Batch 2
Mean defect size		451 µm	357 µm
Murakami-Endo model	R = -1	σ_a = 150 MPa	σ_a = 180 MPa
	R = 0.555	σ_m = 363 MPa σ_a = 104 MPa	-
	R = 0.029	-	σ_m = 159 MPa σ_a = 150 MPa
Experimentally measured values	R = -1	σ_a = 192 MPa	-
	R = 0	σ_a = 123 MPa	σ_a = 148 MPa
	σ_m = 260 MPa	σ_a = 70 MPa	σ_a = 105 MPa

About 215-225 MPa, estimated via other R values



© WÄRTSILÄ

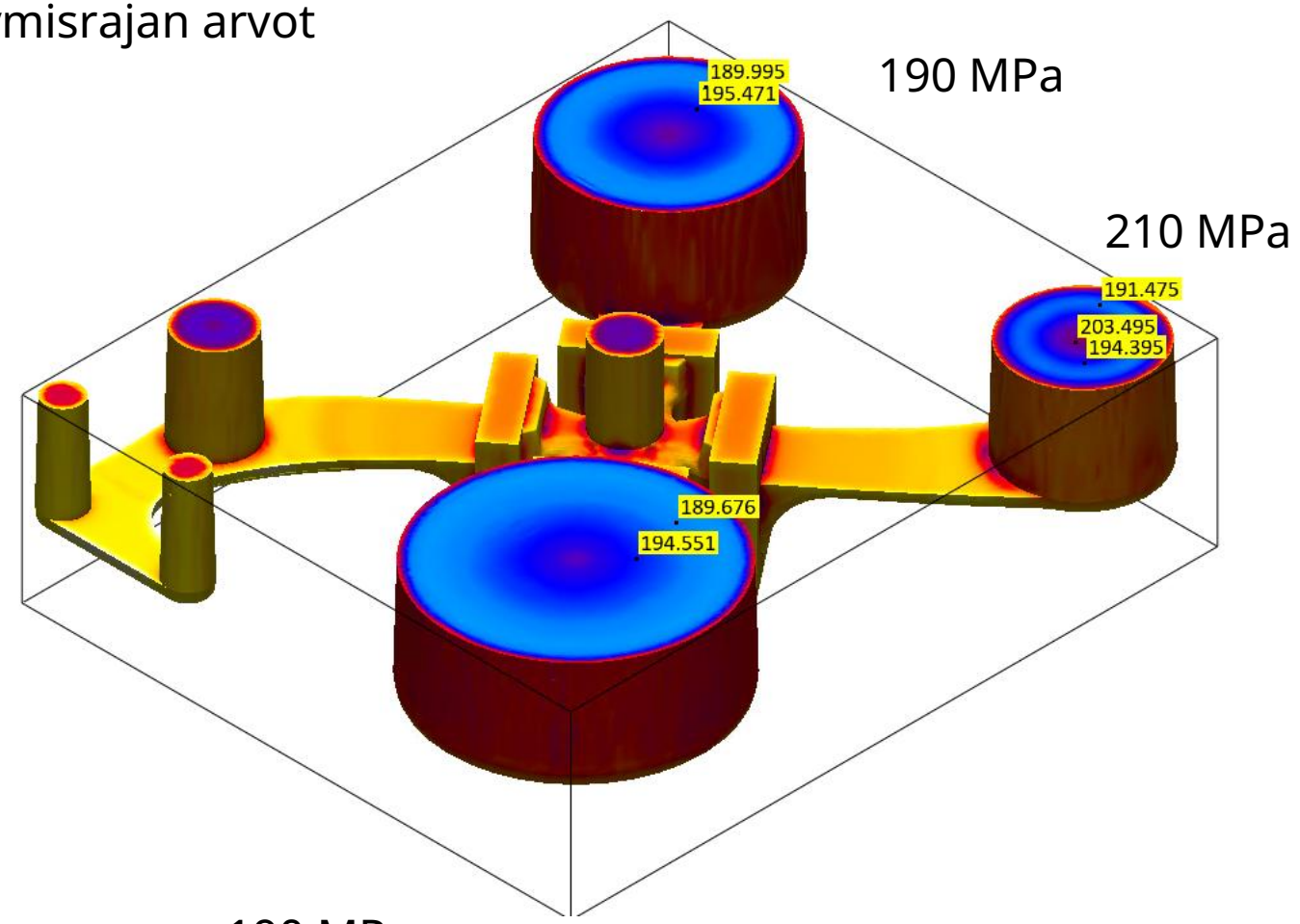
Valusimulaatio

Mourujärvi ym. 2026

Halkaisijat:
400
300
200
100
50
Tutkittu 3 suurinta

Materiaali EN-GJS-600-10

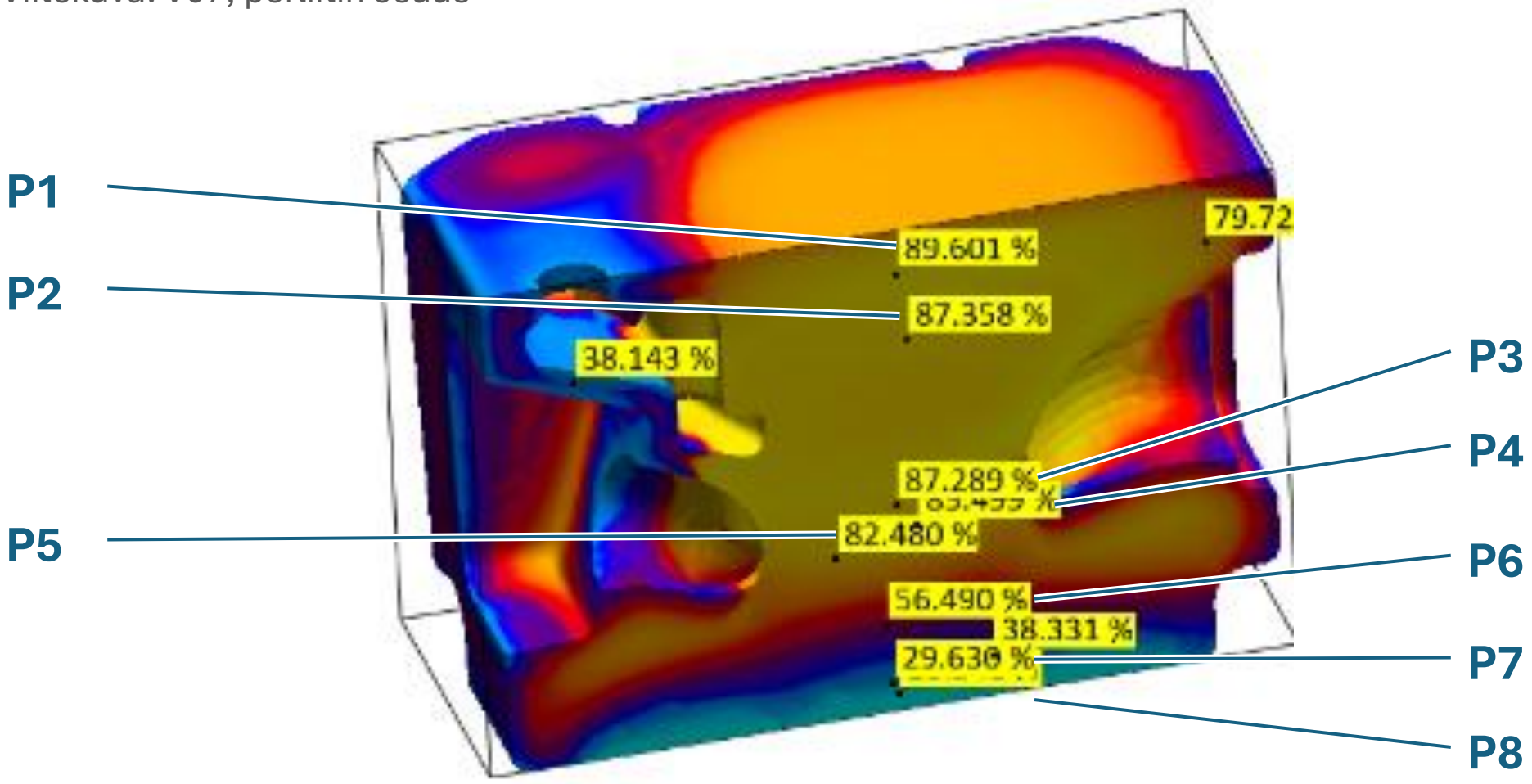
Mitatut
väsymisrajan arvot



© WÄRTSILÄ

Pisteiden numerointi P1–P8

Viitekuva: V07, perliitin osuus



Numerot vastaavat taulukoiden sarakkeita. P4:n ja P8:n arvot peittyvät tässä lähdekuvassa.

© WÄRTSILÄ

“Tehollinen väsymislujuus”

Lähdetulos: Effective_fatigue

Versio	Cu (%)	Si (%)	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
V01	0,50	2,0		154,630	152,105	152,079		161,353	201,878	
V03	0,55	2,6			165,088	163,843		158,917	187,319	
V04	0,45	2,6			154,107	153,187		154,385	190,581	
V05	0,35	2,6	156,711	154,544	152,939	151,967		158,883	200,147	
V06	0,35	2,0	157,954	156,243	154,251	153,647			170,166	
V07	0,35	2,3	156,339	154,526	152,260	151,831	151,591	157,563	195,333	
V08	0,45	2,3	162,985	160,986	159,014			156,385	186,244	
V09	0,55	2,3	173,052	171,090	169,208	167,254		162,301	182,591	

P1–P8: kuvien sijainnit ylhäältä alas. Tyhjä = arvo puuttuu tai ei erotu. Tarkat mittauskohdat voivat vaihdella.

V05: Cu- ja Si-pitoisuudet puuttuvat lähdediasta. V07: alempi oikeanpuoleinen lisäpiste 172,759. Lähdekuva ei ilmoita tulosten yksikköä.

© WÄRTSILÄ

Väsymislujuus Rt

Lähdetulos: total_fatigue_strength

Versio	Cu (%)	Si (%)	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
V01	0,55	2,0		173,784	171,321	170,056		169,361	201,307	
V03	0,55	2,6			203,486	201,638		188,569	206,788	
V04	0,45	2,6			188,246	186,563		177,870	206,808	
V05			175,870	173,487	171,375	170,736		168,185	199,882	
V06	0,35	2,0	184,067	181,669	179,399	178,247			176,213	
V07	0,35	2,3	180,300	177,302	174,674	173,480	172,044	169,337	197,394	
V08	0,45	2,3	196,083	193,314	191,005	188,230		178,743	198,882	
V09	0,55	2,3	209,140	206,590	204,352	201,526		190,189	198,893	

P1–P8: kuvien sijainnit ylhäältä alas. Tyhjä = arvo puuttuu tai ei erotu. Tarkat mittauskohdat voivat vaihdella.

V05: Cu- ja Si-pitoisuudet puuttuvat lähdediasta. V07: alempi oikeanpuoleinen lisäpiste 179,299. Lähdekuva ei ilmoita tulosten yksikköä.

© WÄRTSILÄ

Lämmönjohtavuus

Lähdetulos: Thermal_conductivity

Versio	Cu (%)	Si (%)	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
V01	0,50	2,0		31,669	31,530	31,990		35,306	40,227	
V03	0,55	2,6			26,328	26,410		28,409	32,817	
V04	0,45	2,6	26,839	26,828	26,807	26,968		30,135	33,966	
V05	0,35	2,0	31,760	31,742	31,857	31,689		35,698	40,103	
V06	0,35	2,0	29,455	29,587	29,572	29,721			37,301	
V07	0,35	2,3	30,075	30,383	30,393	30,639	31,055	34,631	39,164	
V08	0,45	2,3	27,636	27,740	27,723	27,964		30,620	35,075	
V09	0,55	2,3	27,387	27,434	27,425	27,555		29,130	33,708	

P1–P8: kuvien sijainnit ylhäältä alas. Tyhjä = arvo puuttuu tai ei erotu. Tarkat mittauskohdat voivat vaihdella.

V05: Cu- ja Si-pitoisuudet puuttuvat lähdediasta. V07: alempi oikeanpuoleinen lisäpiste 37,130. Lähdekuva ei ilmoita tulosten yksikköä.

© WÄRTSILÄ

Perliitin osuus

Lähdetulos: Fraction of Pearlite, %

Versio	Cu (%)	Si (%)	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
V01	0,50	2,0		78,018	79,024	75,681		44,313	15,818	
V03	0,55	2,6			95,888	95,108		76,095	34,176	
V04	0,45	2,6	91,029	91,138	91,331	89,801		59,679	23,248	
V05			77,351	77,488	76,650	77,873		48,738	16,724	
V06	0,35	2,0	94,103	93,149	93,257	92,172			37,088	
V07	0,35	2,3	89,601	87,358	87,289		82,480	56,490	29,630	
V08	0,45	2,3	95,373	94,514	94,655	92,670		70,790	34,084	
V09	0,55	2,3	97,427	97,036	97,112	96,037		83,062	45,342	

P1–P8: kuvien sijainnit ylhäältä alas. Tyhjä = arvo puuttuu tai ei erotu. Tarkat mittauskohdat voivat vaihdella.

V05: Cu- ja Si-pitoisuudet puuttuvat lähdediasta. V07: kaksi päällekkäistä arvoa jää tyhjäksi. Alempi oikeanpuoleinen lisäpiste 38,331 %.

© WÄRTSILÄ

Johtopäätökset

- Valusimulaatio ennustaa täyttymisen ja jähmettymisen lisäksi mikrorakenteen sekä siitä riippuvat paikalliset materiaaliominaisuudet
- Perliitin osuus ja piipitoisuus ratkaisevat pallografiittivaluraudan lujuuden ja lämmönjohtavuuden – simulaatio näyttää niiden vaihtelun komponentin eri kohdissa
- Murakami-Endo-malli yhdistettynä simuloituun mikrorakenteeseen (matriisin kovuus ja vikakoko) mahdollistaa väsymislujuuden arvioinnin jo valusuunnitteluvaiheessa

© WÄRTSILÄ