

STÅL I LOK 1 OG 2 PÅ SETESDALSBANEN

Av: Nils Chr Hagen

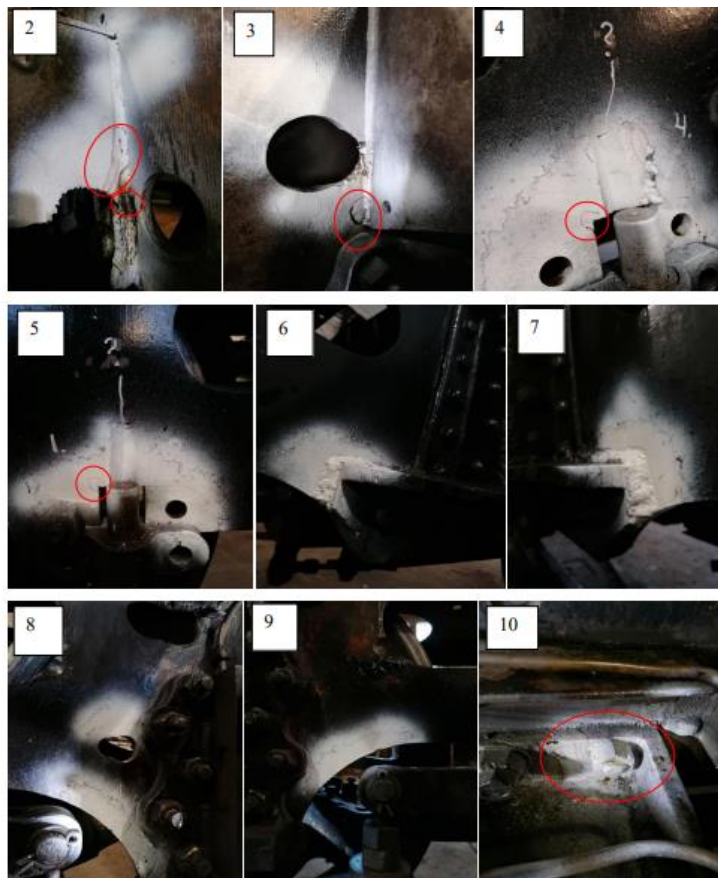
I «Nytt fra Setesdalsbanen» Nr 111 kan vi lese om Lok 1 og 2 i deres første år på Setesdalsbanen [1]. Lokene av type XXI ble bestilt i mars 1894 hos Dübs & Co i Glasgow i Skottland. Allerede i juli 1894 ble de levert på kaia i Kristiansand, og etter noen ukers prøvekjøring ble maskinene satt inn i grusingen av Setesdalsbanen. Lok 2 gikk upåklagelig, men for Lok 1 ble det problemer med kjelerørene og kjelen. Lenge før ett år var gått, måtte kjelerørene tas ut. Var det brukt dårlige materialer?

Innledning

Gamle stålmaterieler er kanskje for de spesielt interesserte. Men nå i 2022 vet vi at det er god materialkvalitet i ramma på Lok 2, og derfor lar jeg det være utgangspunkt for å fortelle fra reparasjonen av ramma vinteren 2021/22. Teknikkhistorie kan kombineres med valg om hvordan museumsmateriell skal behandles.

Lok 2 får hovedrevisjon. Kjelen, som ikke er den samme som i 1894, er i England. Resten repareres i verkstedet på Grovane, under ledelse av Vidar Krogstad og med hjelp av GOT Services AS, Avd. Vennesla. Ramma består av to vertikale, langsgående, 19 mm tykke plater, som på tvers er forbundet med vertikale og horisontale plater, vinkler og nagler. Setesdalsbanens personale hadde oppdaget sprekker, og Stål-consult A/S, det vil si jeg, ble engasjert til å sjekke ramma for løse nagler og flere sprekker, samt lede arbeidet med utbedringer.

Noen sprekker var lette å få øye på, mens andre først ble oppdaget etter at Limas Inspection as hadde utført Magnetisk Partikkel Inspeksjon – MPI – på ramma [2]. På Bilde 1 er sprekken markert med røde ringe.



Bilde 1

Problemer

Dette så ikke bra ut, hva skal vi gjøre? Det ble tatt kontakt med Krøderbanen ved Odd Arne Lyngstad, som har hatt lignende problemer på Lok 225 av type 21b. Dette loket ble levert av Thune i 1911, og er dermed 15 år yngre enn Lok 2.

Lyngstad [3] mente at sprekkeene ikke var så ille, og at de kanskje bare var overflatesprekker som kunne slipes eller være som de er. På Lok 225 var det verre, for der er det for dårlig sideveis avstivning av ramma. Det var laget en Finite Element Analyse for Lok 225, som stemte med skadene. Han anbefalte å se om det var mye slitasje i bolthullene til gangbrettene på Lok 2.

Lyngstad sa også at på Lok 225 var rammeplatene ikke valset, men «banket». Dette forteller noe om hvilken type stål som er benyttet. I praksis er det stål med relativt lavt karboninnhold og mye svovel og fosfor. Forurensningene i stålet ligger i laminære lag, noe som gjør sveising til en risikosport. Fordelen kan være at sprekker i overflaten bare er i overflaten og at de ikke vokser inn i ramma/plata.

På Lok 225 er det gjort omfattende forsterkninger i form av lasker og passbolter for å unngå sveising og forbedre sideveisstivheten.

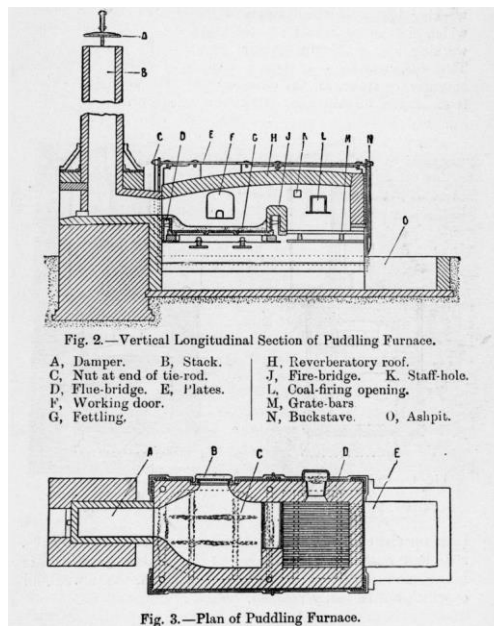
På Lok 2 er det sveist flere steder i NSB-tida. Når det var, vet vi ikke, NSB begynte med sveising allerede i 1920-årene. Men sveising betyr ikke nødvendigvis at stålet er sveisbart: Det kan også bety at det var noe nødtørftig som NSB gjorde for å holde materiellet gående så lenge som mulig, og at de antok at loket ikke hadde mange år igjen uansett.

Nå skal Lok 2 leve videre i uendelig tid. Det er en museumsgjenstand samtidig som sikkerheten ved kjøring må være i varetatt.

Gamle stålmaterialer

Den gang man laget alle sammenføyninger ved hjelp av nagler og bolter, kan man forenklet si at strekkstyrke og forlengelse før brudd var de viktigste egenskapene hos jern og stål. Begge egenskaper skal helst være så store som mulig. Fortsatt noe forenklet er det karboninnholdet som styrer egenskapene: Lavt karboninnhold gir liten strekkstyrke og stor bruddforlengelse. Høyt karboninnhold gir stor strekkstyrke og liten bruddforlengelse. Dette er kjent fra gammelt av, men det var først i siste halvdel av 1800-tallet at ny teknologi kunne styre karboninnholdet med nøyaktighet, slik at stål kunne fremstilles i større mengder og med bedre kvalitet enn tidligere. Sveising slik det gjøres i dag, var ikke aktuelt.

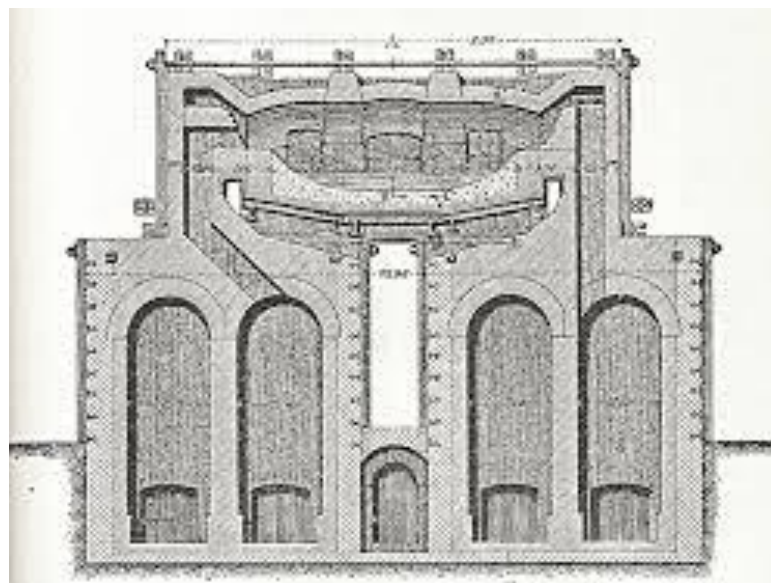
Stålet i Lok 225 er sannsynligvis såkalt puddelstål, som var beste teknologi før 1860. Råjern er resultatet fra behandling av jernmalm i masovner. Det kunne lages i egen regi, eller komme fra andre steder i form av små blokker; Sverige var en stor eksportør av såkalte *tackor*. Ved Puddel-prosessen utnyttet man at råjern med høyt karboninnhold har relativt lavt smeltepunkt, slik at det kunne gjøres flytende i spesielle flammeovner, det vil si puddelovner. Bilde 2 [4] viser en slik ovn. I korte trekk er fremgangsmåten slik [5]: Fra 300 til 500 kg råjern legges på en herd som er foret med oksygenholdig materiale, f. eks. jernoksyd, markert som G på bildet. Kull eller torv brennes på rista M og røykgassene føres over råjernet og opp gjennom skorsteinen. På grunn av hvelvet H reflekteres varmen nedover mot herden og det blir varmt nok til at råjernet i herden smelter. Deretter starter puddlingen, som betyr at det røres for hånd med lange jernstenger rundt i den flytende massen inntil karbonet er oksydert, det vil si brent opp. Slagg kan tilsettes slik at andre grunnstoffer enn karbon oksyderes. Men når karbonet minker, øker smeltetemperaturen og smelten blir som en deig. Operatøren må da stå i døråpningen F og fiske ut klumper på ca 60 kg, som i varm tilstand føres videre til en hammer eller valse for å bli til såkalte rå-skiner. For å få nok stål til en plate eller en jernbaneskinne, må mange rå-skiner pakkes til bunter, som smis sammen og deretter valses eller bankes ut til de ferdige produktene. Ikke uventet kan det da bli lagdeling i stålet.



Bilde 2

Puddel-prosessen er meget gammel, men ble gjenoppfunnet i England på 1700-tallet. Den regnes som nøkkelteknologi i den industrielle revolusjonen. Stålkvaliteten var sterkt personavhengig; operatøren måtte være fysisk sterk, tåle varme og røykfylt luft, samt ta raske avgjørelser om når klumpene skulle fiskes ut. Størrelsen på klumpene kunne man ikke gjøre mye med, så mengden produsert stål i hver ovn var begrenset. I følge [6] er ingen originale puddelovner i UK bevart, men to steder er ovner rekonstruert.

Et større gjennombrudd i stålfremstilling skjedde i 1864 med Siemens-Martin-prosessen. Ovnene er vist på Bilde 3 [4]. Faktisk ligner den litt på puddelovnen i Bilde 2 med åpen herd under et hvelv. Den store forskjellen er at i Siemens-ovnen regenereres varmen fra røykgassene [5]. Gjennom å føre gasser og uteluft gjennom en varmeveksler av kamre, spjeld og magasiner under ovnen, blir uteluften forvarmet før forbrenning. Og den forvarmede luften øker flammtemperaturer så mye at stålet i herden ikke stivner, selv om karbonet forsvinner fra smelten. Den naturaliserte engelskmannen Sir William Siemens fikk patent omkring 1860, men det var franskmennene Pierre og Émile Martin som satte opp den første ovnen.

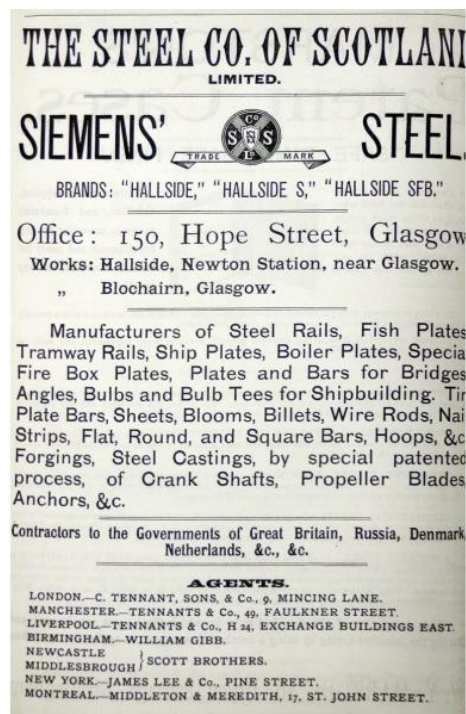


Bilde 3

Sammenlignet med puddelovnen holdt altså stålet seg flytende og ingen klumper skulle flyttes og senere bankes sammen.. Mye større mengder råjern kunne behandles i hver omgang. Skrapjern kunne også smeltes. Når stålet ikke stivnet, hadde man tid til analyser og det ble mulig å beregne og tilsette riktig mengde legeringsselementer for å oppnå ønskede egenskaper.

Andre nye metoder kom også i siste halvdel av 1800 tallet, slik som Bessemer- og Thomas-prosessene, hvor flytende råjern ble til stål i en åpen beholder ved å blåse luft inn i bunnen av beholderen. Men kvaliteten ble ikke så god som i Siemens-Martin-prosessen.

Siemens-Martin-prosessen ble populær i Skottland, noe annonsen fra 1881 på Bilde 4 [7] viser. Tidsskriftet «Engineering» [8] opplyser i 1890 at «The Steel Company of Scotland» leverte minst 38 000 tons stål til den nye Forthbrua, som nettopp var ferdig. Alt stål var Siemens-stål. Alle plater og profiler ble valset hos selskapets Blochairn and Newton Works nær Glasgow, og de ble levert ferdig kuttet med riktig lengde og form. Det gikk også med mye Siemens-stål til skipsbygging; Skottland var en av verdens ledende skipsbyggingsnasjoner.



Bilde 4

Prosessen var den mest brukte helt frem til siste halvdel av 1900-tallet. Det viste seg nemlig at stålet også var sveisbart fordi innholdet av karbon, svovel og fosfor var lavt, eller innholdet kunne minskes ved å tilsette passende legeringsselementer og bruke basisk foring i ovnen.

Sveising i ramma på Lok 2

Sprekkene på posisjon 4 og 5 ble funnet å gå tvers igjennom plata, mens de andre ble vurdert til å være for dype til å slipes vekk.

Moderne konserveringsteori er å gjøre minst mulig [9], utover det som er nødvendig for sikkerheten.

Om man vil sveise i eldre stål må man først undersøke om det er realistisk [10]. Det betyr at man må gjøre en sveisbarhetsundersøkning eller sveisbarhetsvurdering. Av praktiske årsaker var analysen av stålet ikke kjent da denne vurderingen ble gjort. Men siden det ikke var tegn til laminering, samt at NSB hadde sveist, antok vi at stålet kunne være sveisbart dersom sveiseprøver viste positivt resultat.

Mulig laminering ble ytterligere undersøkt på et lite påkjent sted, ved å slippe den kanten av ramma som vender opp. Man fikk altså se stålet i tykkelsesretningen, men ingen sprekker kunne sees. Arild Melve fra GOT Services sveiste deretter to sveiseprøver i nærheten av det samme stedet på ramma. Den første prøven var en sveiselarve utenpå plata, det vil si en påleggsveis slik som NSB har reparert sprekker tidligere. Det ble brukt «diamondspark 52 RC» rørtråd Ø 1,0 mm med rutil kjerne [11] og M21 gass, uten forvarming. Prøven viste god heft.

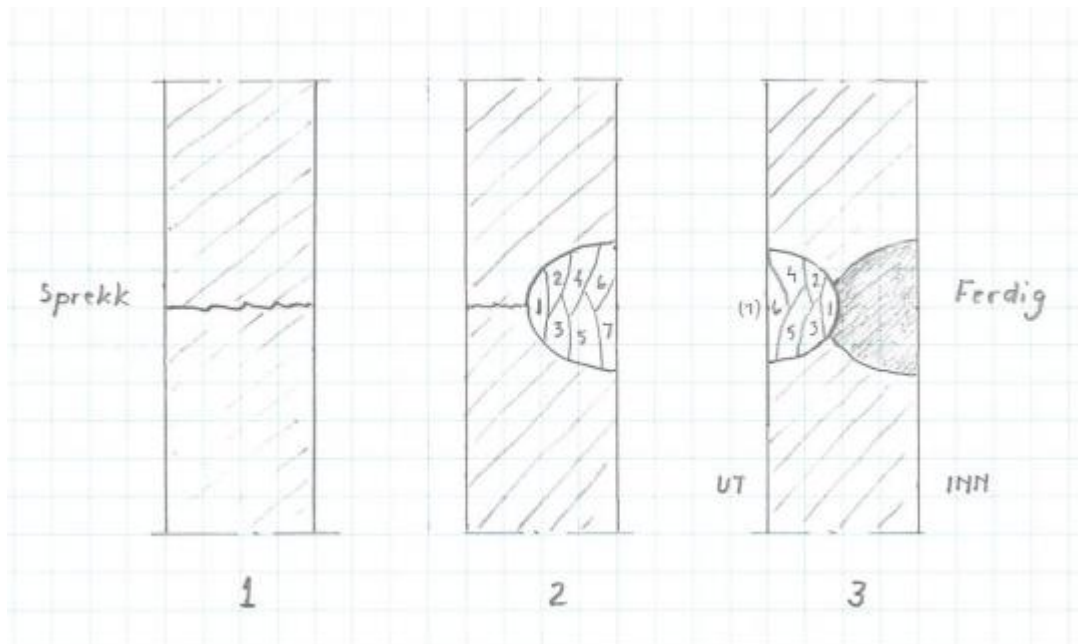
Den andre prøven ble utført slik den 21.1.22:

- På kanten av plata som vender opp, ble det saget med baufil en 10 mm dyp sprekk.
- Sprekken ble deretter slipt bort med roterende fil. Dermed oppstod en U-fuge ca 15 mm bred og ca 11 mm dyp. Dette følger anbefalingen i [10], ved at $15/11 > 1$, det vil si at bredden er større enn inntrengningen. U-fuge er også bedre enn V-fuge for å unngå rotfeil.
- Området rundt fugen ble forvarmet med gassflamme til ca 200 °C. Forvarming gjøres for å redusere eller unngå varmespenninger, herding og sprekkdannelse under kjølingen etter sveisingen.
- Fugen ble utført ifølge sveiseprosess 136, «*Flux Core Arc Welding*», som oppgitt på Melves sveisesertifikat [12]. Det var nødvendig med i alt 7 passeringer med den samme rørtråden som i den første prøven.. Sliping med den roterende fila mellom hver passering. Etter 3. passering ble temperaturen 30 mm fra kanten av fugen målt til 150 °C.
- Siden dette var en svært kort fuge, dvs 19 mm, var det nødvendig å sveise også endene med i alt 3 passeringer i hver ende.
- Tilslutt ble sveisen slipt plan i toppen av fugen og i begge ender.

Filosofien var at hvis dette gikk greit, så kunne vi gjøre det samme med sprekken. Hvis det ikke gikk greit, måtte vi uansett gjøre noe annet, men prøven ville da være på et lite kritisk sted.

Nå skulle det vært tatt ultralyd og MPI av prøven, men av praktiske årsaker ble det utsatt til senere. Resultatet av ble likevel vurdert til å være så bra, at man kunne gå over til å reparere de egentlige sprekken, og deretter ta kontroll av alle sveiser samtidig.

Den 2.2.22 ble det reparert på posisjon 4 og 5. Dette ble utført som beskrevet for den andre prøven, men nå måtte fugene være to-sidige og vertikale. Forvarmingen var 350 °C. Se Bilde 5 og 6. Selv om Melve ikke hadde sertifikat som dekket denne type sveis og arbeidsstilling, vurderte jeg det slik at det ville gå greit. Det er altså den andre prøven som er sveiseprosedyre for reparasjonene.



Bilde 5: Sveising med to-sidig U-fuge



Bilde 6: De første fugene fra den ene siden

Den 3.2.22 ble det reparert på posisjon 2 og 3, det vil si på tverrplatene, samt der det var tatt ut en materialprøve. I tverrplatene ble fugene noe mindre på grunn av tynnere plater.

Fordelen ved å vente med kontrollen er at kaldsprekker kan ta tid på å utvikle seg. Den 8.2.22 kontrollerte Limas Inspection alle sveisene med ultralyd og MPI. Alt var OK, unntatt på to steder på tverrplatene. Disse ble reparert 9.2.22 og kontrollert 10.2.22. [13].

I prinsippet skal man ikke forbedre en museumsgjenstand [9]. Men ved de skarpe hjørnene nr 4 og 5 på Bilde 1 ble det, ved hjelp av sveisen, laget en radius for å redusere spenningskonsentrasjoner.. Det er det plass til, det er ikke synlig, og det har stor betydning for å hindre nye sprekker i å starte. Se Bilde 7.



Bilde 7: Ferdig sveis med avrunding på endene

Stålet i ramma

I nærheten av den andre sveiseprøven, ble det skåret ut en trekantformet bit av plata, ca 16 x 16 mm, som ble sendt til SINTEF Norlab for analyse. «Skadestedet» ble reparert tilsvarende som sveiseprøven. Resultatet av analysen er vist i den grønne linja i tabellen nedenfor [14]. Til sammenligning viser tabellen også kravene til S235JR, som er et moderne, sveisbart konstruksjonsstål.

Lokramme Lok 2			C	Mn	Cr	Mo	V	Ni	Cu	Si	P	S	N	Nb	Al		Fe
SINTEF Norlab			0,17	0,80	0,01	0,02	0,01	0,01		0,06	0,06	0,08	0,002				98,78
			23C	-0,5Mn						-1,2Si	7,5P	19S		4,5Nb	-1,4Al	-0,10	
Varmsprekker	VSF	5,31	3,91	-0,40						-0,07	0,45	1,52		0,00	0,00	-0,10	
			C	Mn/6	(Cr+Mo+V)/5			(Ni+Cu)/15									
Kaldsprekker	C _{ekv}	0,31	0,17	0,13	0,01			0,00									
S235JR t = 19 mm			C	Mn	Cr	Mo	V	Ni	Cu	Si	P	S	N	Nb	Al		Fe
NS-EN 10025-2:2005 Tabell 9			0,17	1,40					0,55		0,035	0,035	0,012				97,80
			23C	-0,5Mn						-1,2Si	7,5P	19S		4,5Nb	-1,4Al	-0,10	
Varmsprekker	VSF	4,04	3,91	-0,70						0,00	0,26	0,67		0,00	0,00	-0,10	
			C	Mn/6	(Cr+Mo+V)/5			(Ni+Cu)/15									
Kaldsprekker	C _{ekv}	0,44	0,17	0,23	0,00			0,04									

Det sees at stålet i Lok 2 har like mye karbon, men mer svovel og fosfor, sammenlignet med S235JR. I følge [10] var det først ved slutten av 1800-tallet at noen større grad av svovel- og fosforfjerning kunne oppnås, ved at Thomas-prosessen og basisk Siemens-Martin-prosess ble utviklet. Før den tid var man avhengig av rent utgangsmateriale. Siden det er lite nitrogen, og støttet av annonsen på Bilde 4, antar jeg at stålet i lokramma er fremstilt med den opprinnelige Siemens-Martin-prosessen. Det er såkalt halvtettet, fordi silisiuminnholdet er 0,06 %.

Limas Inspection har tatt hardhetsmåling av stålet [15]. Basert på HB-verdier er det beregnet en bruddgrense $R_m = 457 \text{ MPa}$ og en flytegrense $f_y < 285 \text{ MPa}$.

Risikoen for varmsprekker ved sveising er først og fremst bestemt av innholdet av karbon, svovel og fosfor, men også av andre elementer. Dette er sprekker som kan dannes i selve sveisegodset ved temperatur over 1000°C. En empirisk formel for varmsprekk-risiko-faktoren er

$$VSF = 23C + 19S + 7,5P + 4,5Nb + 1,2Si - 0,5Mn - 1,4Al - 0,1$$

VSF skal være så liten som mulig. I tabellen er $VSF = 5,31$ for Lok 2 og $4,04$ for S235JR. I vårt tilfelle er risikoen for varmsprekker motvirket ved å bruke U-fuge med bredde/dybde > 1 . I tillegg kunne det vært brukt en basisk elektrode, som bedre tar seg av høyt innhold av svovel. Men denne er vanskeligere å sveise med og sveisesertifikatet gjaldt ikke. Siden det gikk greit på prøvene, holdt vi oss til en rutil-elektrode med lavt innhold av karbon og relativt høyt innhold av mangan og silisium.

Risikoen for kaldsprekker ved sveising er først og fremst bestemt av innholdet av karbon, men også av andre elementer. Dette er sprekker som kan oppstå i varmepåvirket sone i grunnmaterialet ved temperaturer under 200°C, som følge av hydrogeninnhold og ved for rask herding. En empirisk formel for kaldsprekk-risiko-faktoren er den såkalte karbonekvivalenten,

$$C_{ekv} = C + 0,17Mn + 0,20Cr + 0,20Mo + 0,20V + 0,07Ni + 0,07Cu$$

C_{ekv} skal være så liten som mulig. I tabellen er $C_{ekv} = 0,31$ for Lok 2 og $0,44$ for S235JR. Det er altså liten fare for kaldsprekker. I vårt tilfelle ble det utført forvarming for å minske faren for kaldsprekker, men det kan i ettertid vurderes til å være et «føre var»-tiltak.

Konklusjonen min er at Dübs benyttet de beste materialene som fantes i 1894. Noe annet ville vært forbausende, for det var en velrennomert bedrift og Lok 2 har byggenummer 3173. Om de virkelig hadde levert så mange lok som tallet tyder på, vites ikke. Men da kjelerørene på Lok 1 ble tatt ut i 1895, ble det funnet en planke (620 x 90 x 60 mm) i kjelen. Det viste seg at kjelens bunn også var skadet på lignende måte som rørene. Rusthullene ble anslått å være 1/16 tomme = 1,6 mm dype. Siden det var samme skade på både rør og kjelebunn, antar jeg at det var planken som var årsaken. Å glemme en planke er bare et uhell, og skadet nok ikke rennomméet til Dübs.

Sideveis stivhet for Lok 2

Det er ikke funnet slitasje i boltehullene for gangbrettene. Dessuten har Lok 2 neddreide hjulflenser på den midtre drivakselen, med en rille i overgangen mellom hjulbane og flens. Dette gjør at sidekraften mellom hjul og skinne bare oppstår på grunn av friksjon, og ikke ved anlegg mellom hjulflens og skinne.

Men det er et langt, åpent felt under kjelen mellom de to rammene. Det er derfor ikke merkelig at det kan bli en viss bøyning av rammene og tverrplatene når loket kjøres. Lokførere mener at de kan merke det. Tidligere har det vært reparert løse nagler i forbindelsene mellom ramme og tverrplate og de vertikale sveisene er antakelig også en modifikasjon på grunn av sidebevegelser. I posisjon 2 og 3 på Bilde 1 kan sprekken også ha samme årsak, men der kan det også skyldes for dårlig avrunding av kanten på platene. Her er det i NSB-tida skåret hull med skjærebrenner for å få plass til armatur på kjelen. Nå er sprekken reparert, men når kjelen er satt tilbake, anbefales det at man sveiser inn en ny platebit og lager et penere hull for å hindre nye sprekker.

Det var fristende å sette inn noen ekstra braketter for å forbedre sideveis stivhet. Men igjen er prinsippet at man ikke skal forbedre museumsgjenstanden, hvis det ikke er nødvendig for sikkerheten. Loket bør bevares slik ingeniørene og verkstedet konstruerte det, for å vise mest mulig hvordan det var. I stedet bør problemet med sideveis stivhet avhjelpes med å kjøre saktere og mer forsiktig.

Det er grunn til å merke seg at i den nevnte artikkelen i «Nytt fra Setesdalsbanen», står det faktisk at lokomotivene er konstruert for 30 km/h! Er dette nytt for mange? Setesdalsbanens Venner oppgir største hastighet til 40 km/h. Litt anekdotisk, og med forbehold om at det kan ha vært et annet lok enn Lok 2: For over 40 år siden var jeg fyrbøteraspirant på Setesdalsbanen og da skulle lokfører og fyrbøter imponere med å vise hvor fort de kunne kjøre, slik at hastigheten var godt over 50 km/h. Det kan ikke mange nok ganger fortelles at fart og antall vogner som trekkes har nesten alt å si for levetiden for lok. Det vises til [16].

Sylinder på Lok 2

Alle sprekken på ramma ble altså reparert med sveis. Men på Bilde 1 viser posisjon 10 at det også er sprekk i flensen på den venstre sylinderen. Hardhetsmålinger [15] tyder på at materialet er støpejern, som i utgangspunktet ikke kan sveises. Forberedelser er begynt for å lage en helt ny sylinder. Dette blir en omfattende og kostbar sak. Men i annonsen på Bilde 4 står det at The Steel Co. of Scotland kunne levere «*Steel Castings, by special patented process*». Kanskje det er støpestål i sylinderen på Lok 2 og at den også kan sveises? Det er tatt initiativ til å gå videre med dette, i første omgang ved å analysere en materialprøve og henvende seg til Glasgow University Archives for å få mer opplysninger.

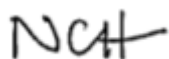
Takk

Takk til Odd Einar Lyngstad for god hjelp, selv om det ble et annet resultat enn for Lok 225. Andre kan også takkes, men siden vi var på jobb sammen, er ingen nevnt og ingen glemt.

Referanser

- [1] Nytt fra Setesdalsbanen. Nr 111. Setesdalsbanens Venner og Vest-Agder-museet Setesdalsbanen, Vennesla 2022.
- [2] MT-report MT 21-07. Limas Inspection as. Mandal 2021.
- [3] O. A. Lyngstad, Krøderbanen, e-post 18.12.21 og senere telefonsamtaler med forfatteren.
- [4] Wikimed9ia Commons
- [5] «Hütte» Des Ingenieurs Taschenbuch. I. Band, p 633-635. Berlin 1920.
- [6] D. de Haan, Association for Industrial Archaeology, e-post 13.6.22 til forfatteren.
- [7] Grace's Guide To British Industrial History. Steel Company of Scotland. Internet 2022.
- [8] Scottish Steelworks History. Hallside 1973-1979. cfinlay@worldonline.co.uk. 2022.
- [9] Chris Caple. Conservation Skills. Judgement, Method and Decision Making. Rutledge. 2000.
- [10] N. Stenbacka. Bedömning av svetsbarhet – spesielt hos äldre konstruktionsstål. Stålbyggnadsinstitutet, SBI-publ 83, Stockholm 1983.
- [11] Böhler Ti 52 T-FD (diamondspark 52 RC), www.voestalpine.com/welding. 07/2019.
- [12] Certificate no. 161125-02-9606-1-KRS-20.
- [13] MT-report MT 22-06 R1. Limas Inspection as. Mandal 2022.
- [14] SINTEF NORLAB, Analyserapport ordrenr 113250 datert 15.3.22.
- [15] PMI-report PMI 22-01 Limas Inspection as. Mandal 2022.
- [16] Stål-consult A/S, Setesdalsbanen – 30-årsplan for damplokomotivene. Rapport 1824-01. 2015.

Kristiansand 16.08.2022



Nils Chr Hagen

Dr. ing.