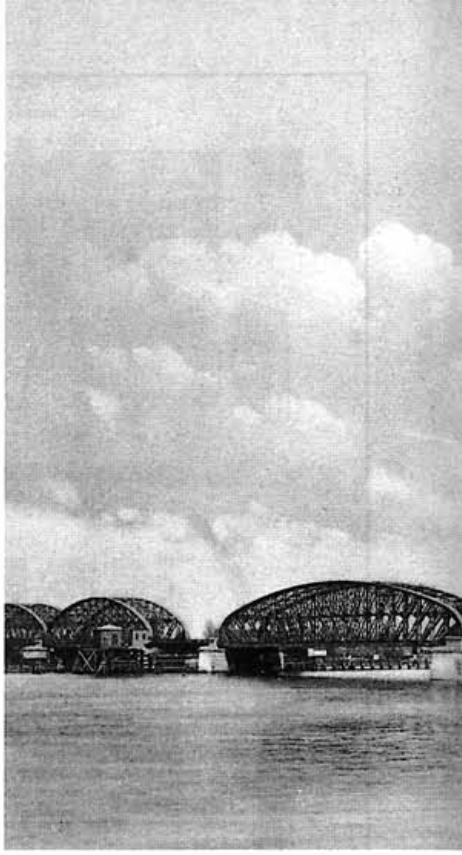
Slaan, trekken en vloeien



Bij het raadplegen van oude bestekken of literatuur stuit de constructeur nogal eens op 'vreemde' benamingen voor de verschillende ijzer- en staalsoorten. Wat is nu precies smeedijzer, geslagen ijzer, getrokken ijzer, basisch vloeiijzer en vloeistaal? Bovendien is lang niet altijd duidelijk om welke soort het gaat en wat de eigenschappen daarvan zijn. Dit artikel geeft een overzicht van de benamingen en de eigenschappen van soorten ijzer en staal die tussen 1840 en 1940 in Nederland zijn gebruikt in constructies.

ing. H.M.C.M. van Maarschalkerwaart
oud-medewerker Nederlandse Spoorwegen, lid commissie 'Erfgoed van ijzer en staal'

In de eerste helft van de vorige eeuw was men in Engeland, de bakermat van de industriële revolutie, in staat op grote schaal ijzer te fabriceren. Dit materiaal werd daardoor geschikt voor een groot aantal constructieve toepassingen. De diverse fabrikanten ontwikkelden in de loop van de jaren een groot aantal kwaliteiten en soorten, elk met andere benamingen. Soms ook waren verschillende benamingen voor hetzelfde materiaal gangbaar.
Bij de confrontatie met constructies uit de tweede helft van de vorige eeuw en het begin van deze eeuw is vaak niet duidelijk met welk materiaal men precies te doen heeft en, vooral ook, welke eigenschappen kunnen worden verwacht. Omschrijvingen in bestekken en handboeken geven belangrijke aanwijzingen, maar ook die verschaffen niet altijd uitsluitsel. De verschillende produktiemethoden, die in aparte kaderteksten staan, zijn het uitgangspunt bij de indeling. Van de belangrijkste soorten en kwaliteiten worden de belangrijkste kenmerken beschreven.

Eigenschappen

In de eerste helft van de 19e eeuw werd er voor het beproeven van het materiaal voor spoorbruggen uitsluitend een bepaalde waarde voor de treksterkte geëist. Rond 1870 stelt de opdrachtgever in het bestek voor het eerst eisen aan de rek. Pas later, in 1900, verschijnen de officiële Nederlandse voorschriften voor ijzer.

Mechanische eigenschappen

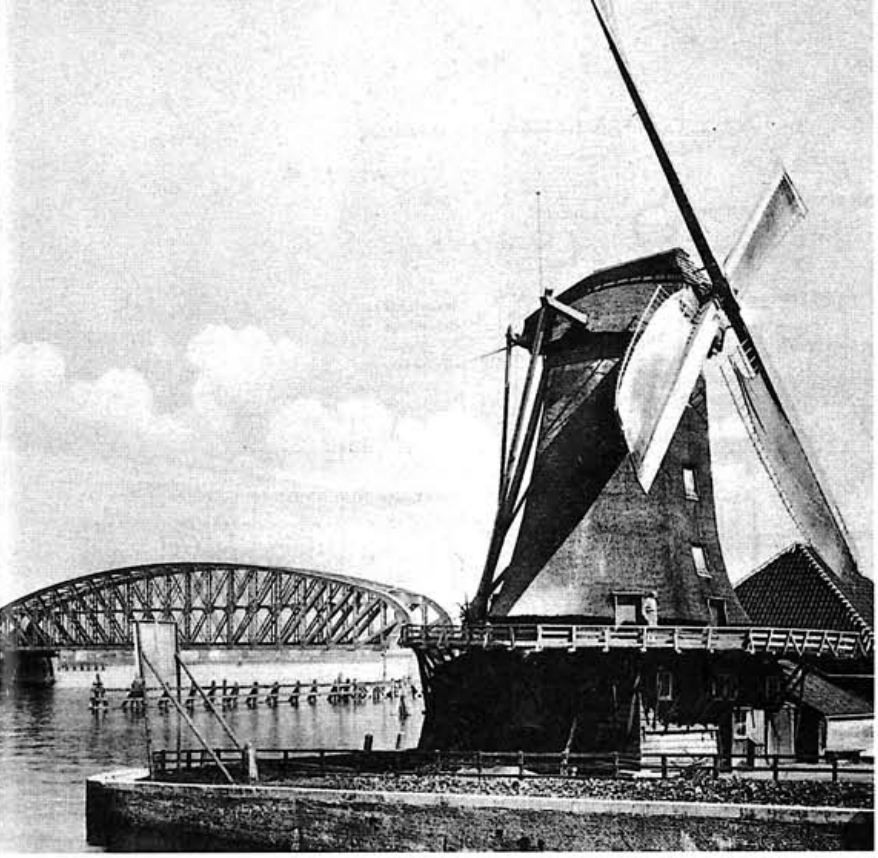
De waarden van de rek werden gemeten met trekproeven. Bij de beoordeling van in het verleden uitgevoerde proeven is het van belang goed te letten op de toegepaste meetlengte, omdat de rek afhangt van de gekozen lengte, waarover de rek na breuk wordt vastgesteld. In de 19e eeuw en het begin van de 20e eeuw werd in veel gevallen een meetlengte van 200 mm aangehouden [2]. De resultaten van rekmetingen zijn uitsluitend vergelijkbaar als de verhouding tussen de meetlengte en de wortel uit de doorsnede van de proefstaven gelijk is. Naast trekproeven kende men ook buigproeven, waarbij werd verlangd dat het materiaal, zonder te breken, over een bepaalde hoek kan buigen.

Chemische samenstelling en structuur

Vanouds was men bekend met de invloed van het koolstofgehalte op de eigenschappen van het ijzer. Bij een gehalte kleiner dan 1,7% is het ijzer smeedbaar. IJzer met een koolstofgehalte van 0,3-1,7% wordt staal genoemd en kan worden gehard door het snel te laten afkoelen. Hierdoor krijgt het ijzer een grotere sterkte, maar wordt het tevens brosser. IJzer met een koolstofgehalte van meer dan 2,5% is goed gietbaar en wordt gietijzer genoemd.
Van het 19e eeuwse smeedijzer dat niet hardbaar was, lag het koolstofgehalte tussen 0,02% en 0,07%. Bij het vloeiijzer was het koolstofgehalte niet hoger dan ongeveer 0,20%. Naarmate het koolstofgehalte hoger is, neemt de treksterkte toe en neemt de rek af.
Men ontdekte rond 1850 dat bij een te hoog fosforgehalte het ijzer bros en daardoor onbruikbaar kon worden. Destijds werd dit koudbrosheid genoemd. Veelal gaat dat gepaard met een grofkorrelige structuur. Naarmate het fosforgehalte hoger wordt, neemt de weerstand tegen stootbelasting af. Bij modern constructiestaal wordt het fosforgehalte beperkt tot maximaal 0,05%. Een te hoog zwavelgehalte heeft tot gevolg dat het ijzer niet goed meer is te smeden of te walsen; er treedt dan scheurvorming op. Dit gebrek werd vroeger rood- of warmbrosheid genoemd. Bij modern constructiestaal is ook het zwavelgehalte beperkt tot 0,05%.

Segregatie

Wanneer bij de fabricage van ijzer veel zuurstof wordt opgenomen, ontstaat ijzeroxide (FeO). Wordt het vloeibare ijzer daarna in de coquilles (mallen) gegoten, dan vinden er heftige reacties plaats, waardoor de stolling door de vrijkomende gassen onrustig verloopt. Door het stollen vanaf de wand naar de kern wordt de concentratie van fosfor, zwavel en koolstof naar binnen toe steeds groter. Men spreekt dan van ongekalmeerd vloeiijzer met segregatie in de kern en een laag van zuiver ijzer aan de buitenkant van het gietblok [8]. De segregatie is ook terug te vinden in de doorsnede van gewalste produkten. Het toepassen van ongekalmeerd staal is ongunstig bij het lassen, dat overigens pas na 1920 gangbaar is geworden.
Wanneer aan het vloeibare ijzer in de gietpan bijvoorbeeld silicium wordt toegevoegd, verloopt het stollen rustiger en worden de onzuiverheden meer gelijkmatig over de doorsnede verdeeld. Aan het einde van de vorige eeuw wist men dit. Er ontstaat dan gekalmeerd ijzer. Achteraf is uit de chemische analyse af te leiden of er al dan niet is gekalmeerd. Bij



Brug over de Oude Maas bij Dordrecht (1869). Deze spoorbrug bestond grotendeels uit welijzer.

Segregatie in een gewalst profiel van Thomas-vloeiijzer.

een siliciumgehalte groter dan 0,01% is er zeer waarschijnlijk gekalmeerd.
Kalmeren kan ook met het toevoegen van aluminium. Het grote voordeel hiervan is dat eventueel aanwezig stikstof wordt gebonden tot aluminiumnitride en een meer fijne structuur ontstaat, waardoor het ijzer taaier wordt [6-8].

Bros breken

Voor het onderzoek van ijzer- en staalsoorten naar de gevoeligheid voor brosse breuk worden kerfslagproeven uitgevoerd. Wanneer deze proef bij verschillende temperaturen wordt herhaald, blijkt er bij een bepaalde temperatuur plotseling minder slagarbeid voor het breken nodig te zijn. Bij een afnemende temperatuur is er een overgang van een taaie naar een brosse breuk. Een brosse breuk gaat gepaard met een lage kerfslagwaarde [6-8]. De temperatuur waarbij er een omslag in kerfslagwaarde plaatsvindt, wordt overgangstemperatuur genoemd. Naarmate deze temperatuur hoger ligt, neemt de gevoeligheid voor brosse breuk toe. Dit werd vooral bekend na onderzoeken in 1945 van het bros breken van gelaste schepen, die tijdens de Tweede Wereldoorlog op de route rond de Noordpool voerden.

Veroudering

Het verschijnsel veroudering heeft men pas ontdekt omstreeks 1925. Veroudering is het verschijnsel waarbij na een plastische vervorming de rek meestal sterk afneemt, terwijl de treksterkte, de vloeigrens en de hardheid toenemen. Een plastische vervorming treedt bijvoorbeeld op bij het richten of het klinken.
Veroudering ontstaat vooral door de aanwezigheid van stikstof. Stikstof diffundeert namelijk na een vervorming naar holten in het kristalrooster en verbindt zich daar tot ijzernitride in de vorm van naalden, waardoor de taaiheid sterk kan verminderen. Naast stikstof speelt bij veroudering soms koolstof een rol.
Het proces van veroudering wordt versneld als er na, of tijdens, de plastische vervorming sprake is van een verhoging van de temperatuur tot in het gebied van de blauwwarmte; dat is het gebied waarin het staal blauw kleurt (250-300 °C).
Bij onderzoek naar de gevoeligheid voor veroudering worden sinds 1925 kerfslagproeven uitgevoerd op materiaal dat kunstmatig wordt verouderd door het eerst 10% te rekken en vervolgens gedurende een half uur op 250 °C te gloeien. In plaats van 10% rekken, komt overigens ook 5% stuiken voor. Vervolgens worden de resultaten van deze proeven vergeleken met kerfslagproeven waarbij het materiaal niet is verouderd. In geval van veroudering zullen de kerfslagwaarden bij de gebruikstemperatuur belangrijk lager zijn en is de overgangstemperatuur naar een hogere waarde verschoven. Vooral het Bessemer-staal en het Thomas-vloeiijzer zijn gevoelig voor veroudering door de opname van stikstof tijdens het doorblazen van lucht tijdens de bereiding [6-8].

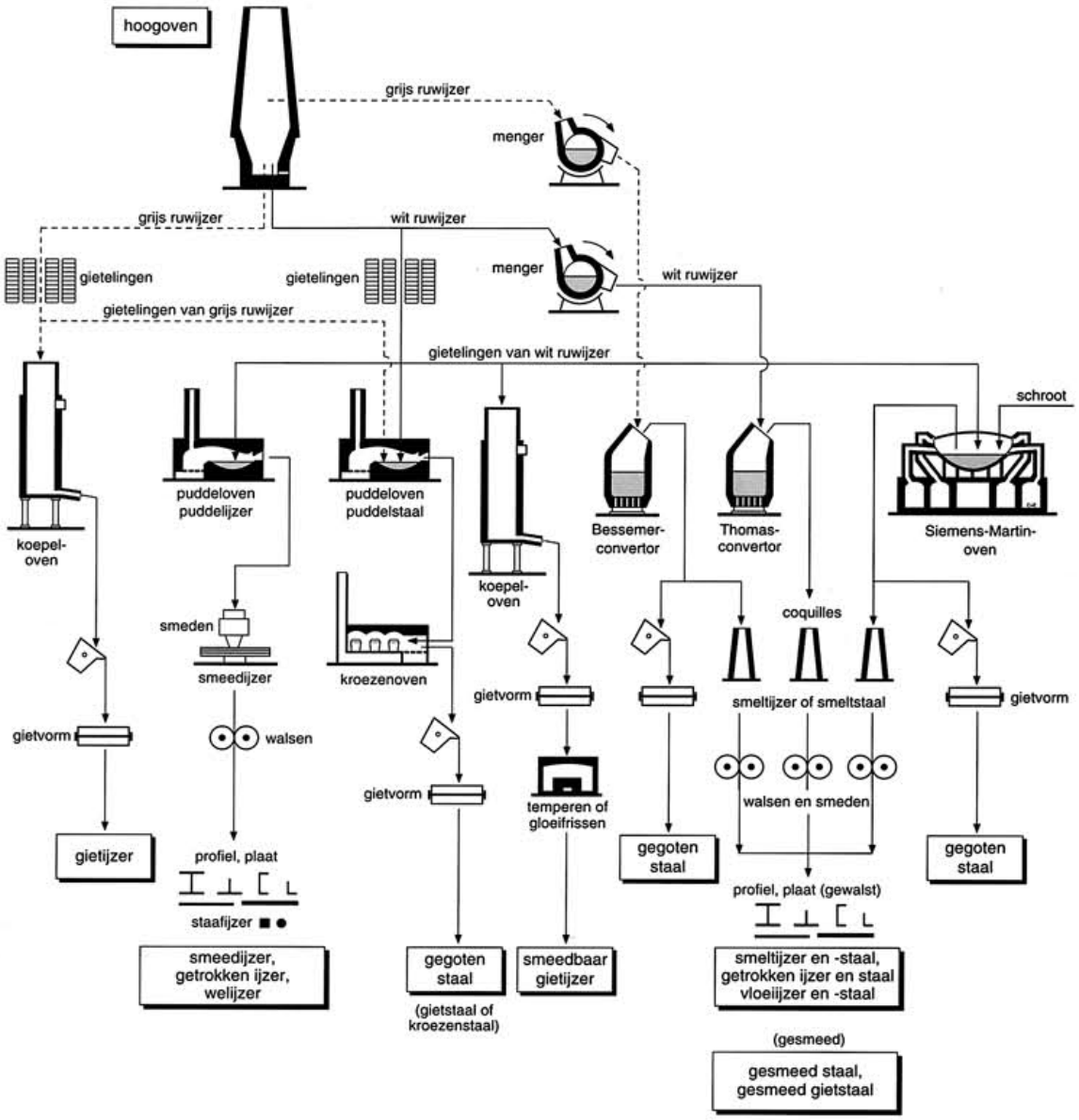
Lasbaarheid

Wanneer een oude ijzer- of staalconstructie moet worden gerepareerd of versterkt, speelt de vraag naar de lasbaarheid vaak een rol. In het algemeen kunnen twee delen van een staalsoort aan elkaar worden gelast, indien het koolstofgehalte van beide minder bedraagt dan 0,2%.
In veel gevallen bevat het oude materiaal een hoog gehalte aan fosfor en zwavel, waardoor brosheid en een poreuze las kunnen ontstaan. Zolang er geen sprake is van krimpspaninningen door het lassen, kan het bezwaar van een hoog fosfor- en zwavelgehalte enigszins worden opgevangen door het toepassen van basische elektroden.
Treden er echter wel inwendige spanningen op door het lassen, dan moeten oude staalsoorten, waarvan het fosfor- en zwavelgehalte van elk groter is dan 0,05%, of samen groter zijn dan 0,10%, als niet-lasbaar worden beschouwd. Het vermogen van het materiaal is dan te klein om vervormingen op te nemen die ontstaan door het lassen [28-30].

Gietijzer

In de hoogoven wordt ijzer bij hoge temperatuur vrijgemaakt uit erts. Onder opname van veel koolstof ontstaat hierbij vloeibaar ruwijzer, dat in zandbedden wordt uitgegoten tot gietelingen of piekijzer. Aangezien ruwijzer veel verontreiniging bevat, wordt het eerst omgesmolten in een koepeloven en heet dan gietijzer. Het is bros en door het hoge koolstofgehalte niet te smeden. In oude bestekken wordt gietijzer meestal gegoten ijzer genoemd. Afhankelijk van de samenstelling en de afkoelsnelheid ontstaat er bij het stollen grijs ruwijzer of wit ruwijzer.

- *Grijs ruwijzer.* Bij een langzame afkoeling en bij aanwezigheid van voldoende silicium komt zuiver koolstof vrij in de vorm van • grafiet. Grijs ruwijzer is dun vloeibaar en daardoor geschikt om voorwerpen te gieten.
- *Wit ruwijzer.* Dit materiaal ontstaat bij aanwezigheid van mangaan en een snelle afkoeling. De koolstof blijft gebonden tot cementiet (ijzercarbide). Wit ruwijzer is hard en bros.



Bereiding van ijzer en staal in de periode 1840-1910 (samengesteld door auteur).

Grijs gietijzer

Gietijzer is een legering van ijzer, koolstof en silicium. Het koolstofgehalte ligt tussen 2% en 4,5% en het siliciumgehalte tussen 0,5% en 3,5%. Verder zijn kleine hoeveelheden mangaan, zwavel en fosfor aanwezig.

De eigenschappen van gietijzer hangen niet alleen af van de samenstelling, maar ook van de hoedanigheid waarin de koolstof voorkomt. Naarmate het siliciumgehalte hoger is, wordt bij langzame afkoeling de koolstof voornamelijk als grafietlamellen afgescheiden en ontstaat het zogeheten grijs gietijzer. Dit materiaal is goed gietbaar en kan na het stollen in het algemeen gemakkelijk met de vijl worden bewerkt. Fosfor maakt grijs gietijzer dun vloeibaar. De hardheid en de brosheid nemen daardoor echter toe; tot 0,7% fosfor is het nog goed te bewerken. Naarmate grijs gietijzer meer koolstof bevat in de vorm van grafietlamellen, is het breukvlak donkerder en het materiaal zachter. Door de grove grafietlamellen is de treksterkte naar verhouding gering. Grijs gietijzer uit de 19e en het begin van de 20e eeuw heeft waarschijnlijk een koolstofgehalte van 3-3,5%; het siliciumgehalte bedraagt 2-3,5%.

In de 19e eeuw hebben de Engelse ingenieurs Hodgkinson en Fairbairn proeven uitgevoerd en vonden een treksterkte van 75-160 N/mm² en een druksterkte van 390-1000 N/mm² [1]. Bij een recent Duits onderzoek is een groot aantal monsters van oude gietijzerconstructies beproefd [25]. De resultaten hiervan waren:

treksterkte	105-180	N/mm²
druksterkte	340-760	N/mm²
E-modulus	85-130.10³	N/mm²
koolstofgehalte	3,0-3,5	%
lengte grafietlamellen	80-500	mm

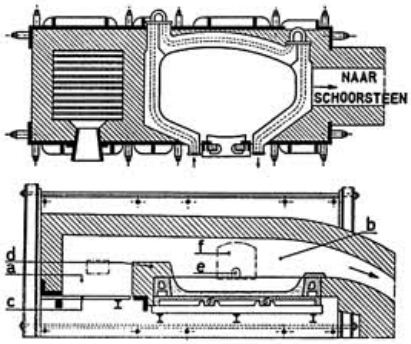
Als elasticiteitsgrens wordt in [9] aangegeven voor trek 65 N/mm² en voor druk 150 N/mm². Om blijvende vervormingen te voorkomen, beveelt Nieswaag aan voor de statische trekbelasting geen grotere trekspanning dan 0,25 maal de treksterkte aan te houden [26]. De elasticiteitsmodulus voor trek en druk zijn verschillend. Bovendien bestaat er geen lineair verband tussen de spanning en de rek. Uitsluitend voor lage spanningen kan als benadering een lineair verband worden aangenomen. Gietijzer heeft bij breuk een zeer kleine rek en bezwijkt bros. Hiervoor was dit materiaal destijds zo berucht.

Lassen

Door het hoge koolstofgehalte van 2-4,5% en het geringe vervormingsvermogen is grijs gietijzer moeilijk lasbaar [31]. Het kan niet op de gewone wijze met een voor constructiestaal gebruikelijke elektrode worden gelast. Dat komt, omdat door de snelle afkoeling het harde, witte gietijzer ontstaat dat door de grote brosheid direct bij het krimpen scheurt.

Voorverwarmen kan een oplossing zijn. De temperatuur moet dan echter zo hoog zijn (600-700 °C) dat het in de praktijk moeilijk uitvoerbaar is. Een alternatief is gebruik maken van speciale elektroden die voor een groot gedeelte bestaan uit nikkel. Nikkel bevordert de af-

Puddeloven.



scheiding van grafiet en gaat de vorming van wit gietijzer tegen. De las blijft zacht en is goed bewerkbaar. Het lassen van gietijzer blijft echter een werkwijze met veel risico's.

Welijzer

Welijzer werd meestal in deegachtige toestand uit wit ruwijzer vervaardigd in de puddeloven en daarna uitgesmeed. Aanvankelijk noemde men welijzer daarom ook smeedijzer. Omstreeks 1880 kon de benaming smeedijzer niet meer worden gehandhaafd, omdat toen ook met het Thomas- en met het Siemens-Martin-proces smeedijzer kon worden geproduceerd. Welijzer heeft een gelaagde en vezelige structuur. De kwaliteit wordt sterk bepaald door de gebruikte legeringselementen en de wijze van uitsmeden. Bij het uitsmeden worden de slakken uitgedreven en ontstaat een meer fijne structuur. Hierbij zijn de temperatuur en het aantal malen dat het materiaal wordt verwarmd en wordt uitgesmeed of gewalst, van grote invloed op de kwaliteit. Kenmerkend voor welijzer zijn het lage koolstofgehalte, het naar verhouding hoge fosforgehalte en de aanwezigheid van kleine slakdelen, ingebed in een grondmassa van zuiver ijzer (ferriet). Grove slakinsluitsels duiden op onvoldoende doorsmeding of doorwalsing. Herhaald gloeien en daarna smeden of walsen leveren een vezelige, homogene structuur op en maken het welijzer sterk. Smeden of walsen bij een te lage temperatuur veroorzaakt een kristallijne structuur, waardoor de taaiheid vermindert. Door het walsen ontstaat een verschil in sterkte-eigenschappen in de walsrichting en in de richting daar loodrecht op.
Er wordt onderscheid gemaakt in verschillende kwaliteiten. Deze komen tot stand door tijdens de fabricage de gesmede staven te breken en de stukken op het breukuiterlijk te sorteren. Vervolgens worden deze stukken in een vlamoven samengeweld en daarna uitgewalst.

Engelse indeling

In de loop van de eerste helft van de 19e eeuw werd voor het eerst in Engeland een indeling van de kwaliteiten van welijzer opgesteld [1, 4]. Voor de bepaling van de rek gebruikte men een meetlengte van 250 mm.

kwaliteit	treksterkte [N/mm²]	rek [%]
merchant bar of common iron	320	4
best	340-360	6-8
best-best	370-380	8-10
best-best-best	400	15

• *Merchant bar of common iron.* Dit ijzer was meestal hard en bros en uitsluitend geschikt voor gewoon smidswerk.
• *Best.* Voor deze kwaliteit werden de beste soorten ruwijzer gebruikt, bijvoorbeeld Yorkshire- en Low-Moor-ijzer. Het ruwijzer hiervoor werd gesmolten met zeer zuivere cokes en koude lucht en vóór het puddelen door omsmelten ontdaan van slak en andere onzuiverheden. De kwaliteit 'best' werd onder meer toegepast voor ketelplaten en bruggen.
• *Best-Best.* Dit ijzer heeft een grote taaiheid en sterkte en werd toegepast voor onder meer kettingschalmen, klinknagels, schroeven en moeren.
• *Best-Best-Best.* Dit ijzer was van nog betere kwaliteit. Het kwam ook voor onder de benamingen Triple Best en Crown Iron. Het werd verkregen uit wit ruwijzer met een hoog gehalte aan gebonden koolstof (spiegelijzer).

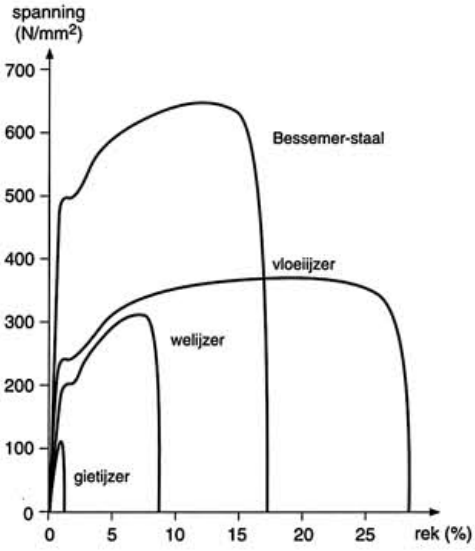
Na Engeland maakten ook Duitsland en België een indeling van de kwaliteiten, die grotendeels met elkaar overeen komen [2, 14]. In Nederland hanteerde men in de vorige eeuw naar believen één van de drie buitenlandse aanduidingen:

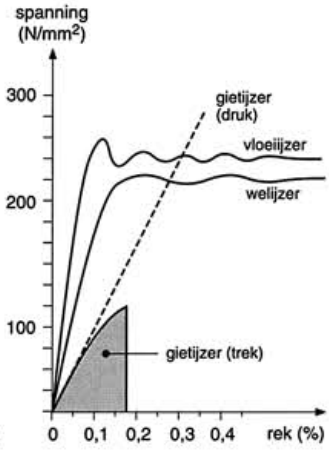
Engeland	Duitsland	België
common iron	handelsijzer	no. 2
best	hoefstaafkwaliteit of scheeps- en ketelplaten	no. 3
best-best	klinknagelkwaliteit	no. 4
best-best-best	–	no. 5

Omstreeks 1950 heeft men in Duitsland oude proefstukken welijzer van met name Nederlandse spoorbruggen, gebouwd tussen 1870 en 1890, opnieuw onderzocht [23]. De chemische analyse van het welijzer gaf het volgende resultaat:

Smeedijzer en -staal

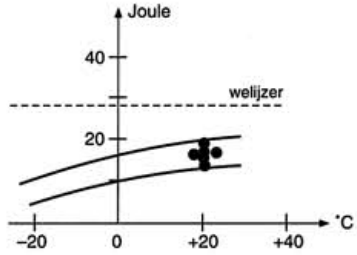
• *Smeedijzer.* IJzer is smeedbaar bij een koolstofgehalte van minder dan 0,3%. Vanouds kende men het smeedbare ijzer dat uitsluitend in kleine hoeveelheden direct uit ijzererts werd gewonnen in een houtskoolvuur. Het ijzer kwam daarbij niet tot smelten. Men verkreeg een deegachtige, gloeiende ijzerklomp, waarin nog veel slak aanwezig was. Doordat er bij de lage temperatuur weinig koolstof werd opgenomen, was het ijzer goed smeedbaar. Door deze klomp voortdurend uit te smeden, werd de slak uitgedreven en ontstond smeedijzer voor het maken van bijvoorbeeld trekankers en spijkers.
• *Puddelijzer.* In 1784 introduceerde Henry Cort het puddelproces, waarmee het mogelijk werd op grote schaal smeedijzer te bereiden. In een puddeloven wordt het ruwijzer uit de hoogoven, dat nog veel koolstof bevat, omgezet in smeedijzer door het te ontkolen via een overstrijkende vlam. Het grote voordeel van dit proces was dat steenkool in plaats van houtskool kon worden gebruikt en het ijzer niet in aanraking kwam met de brandstof. Hierdoor werd vermeden dat zwavel uit de steenkool wordt opgenomen.
Ook bij het puddelproces komt het ijzer niet tot smelten en ontstaat een gloeiende deegachtige massa. Door te smeden wordt de slak uitgedreven en ontstaan lange staven puddelijzer.
• *Geslagen ijzer.* Staven puddelijzer werden gebundeld (gepakketteerd) en samengeweld na opnieuw te zijn verhit. Vervolgens werd dit geheel uitgesmeed (geslagen).
• *Getrokken ijzer.* Van de aaneengewelde en gesmede, gloeiende pakketten puddelijzer kon men profielen en platen walsen (trekken). Na ongeveer 1880 kan getrokken ijzer ook afkomstig zijn van het Thomas- of het Siemens-Martin-proces.
• *Welijzer.* Tot omstreeks 1865 was de benaming getrokken ijzer voldoende om het gewalste, smeedbare ijzer uit de puddeloven aan te duiden. Toen het daarna mogelijk werd ook met andere processen smeedbaar ijzer te bereiden, ging men het smeedijzer uit de puddeloven welijzer noemen. Welijzer is tussen 1860 en 1900 in Nederland op grote schaal gebruikt voor onder meer de spoorbruggen over de grote rivieren. Na ongeveer 1900 werd het niet meer toegepast.
• *Puddelstaal* (later welstaal). Puddelstaal is een harde ijzersoort, dat ontstaat door bij het puddelproces de ontkoling minder ver door te voeren en te zorgen dat het koolstofgehalte tussen 0,3% en 1,7% blijft. Vanaf 1890 noemde men het ook welstaal. De benaming staal hield in de 19e eeuw in dat het verkregen smeedbare materiaal door het hogere koolstofgehalte door snelle afkoeling kon worden gehard. Deze begripsomschrijving van staal is tot omstreeks 1890 ook voor produkten afkomstig van andere processen gehandhaafd.
• *Kroezenstaal.* Puddelstaal is nog niet geheel vrij van ingesloten slakken. Daarom werd het omgesmolten in kroezen. Het op deze wijze gezuiverde puddelstaal noemde men kroezenstaal. Van kroezenstaal maakte men onder meer gereedschappen, kettingen en stalen kabels voor hangbruggen.
• *Gegoten staal* (of gietstaal). Het kroezenstaal werd hierbij in vloeibare toestand direct uit de kroezen in vormen gegoten.





Vergelijk van de trekkrommen van gietijzer, welijzer, vloeiijzer en Bessemerstaal.

Kerfslagproeven (Charpy-V) op niet-verouderd welijzer.



Vloeiijzer, vloeistaal, staal

Omstreeks 1860 kwamen er processen beschikbaar waarbij smeedbaar ijzer en staal ook in vloeibare toestand konden worden bereid. Hierdoor ontstond verwarring over de benamingen.

- *Staal.* Met de nieuwe processen verkreeg men een homogeen slakkenvrij materiaal dat sterk leek op het kroezenstaal. Daarom ging men het nieuwe materiaal staal noemen, ongeacht of het hardbaar was of niet.
- *Zachtstaal.* Hieronder verstond men aanvankelijk de nieuwe produkten met een koolstofgehalte van minder dan 0,15%, die niet hardbaar waren.

Men trachtte in 1890 een einde te maken aan de verwarring door nieuwe definities in te voeren. Echter in 1911 volgden alweer nieuwe aanduidingen:

- *Smeltijzer* (na 1911 vloeiijzer). Dit is smeedbaar, in vloeibare toestand bereid, niet-hardbaar ijzer.
- *Smeltstaal* (na 1911 vloeistaal). Dit is het smeedbaar, in vloeibare toestand bereid, hardbaar ijzer.
- *Staal.* Het begrip hardbaar hangt niet alleen af van het koolstofgehalte maar ook van andere legeringselementen. Het bleek in de praktijk dat het onderscheid tussen ijzer en staal niet altijd nauwkeurig was aan te geven. Omstreeks 1930 ging men er in Nederland toe over, in navolging van het buitenland, om alle in vloeibare toestand bereide, smeedbare ijzersoorten staal te noemen, ongeacht of deze al dan niet hardbaar waren.
- *Basisch vloeiijzer.* Na 1900 schrijft men in bestekken vaak dat het ijzer basisch vloeiijzer moet zijn. Hiermee wordt Thomas-vloeiijzer of Siemens-Martin-vloeiijzer bedoeld, vervaardigd volgens het basische proces.
- *Gegoten staal.* Onder gegoten staal verstaat men na 1880 het in vormen gegoten staal, afkomstig uit de Bessemer-convertor of de Siemens-Martin-oven. Na 1950 ontstaat de benaming gietstaal. Het materiaal hiervoor kan echter ook van andere processen afkomstig zijn, bijvoorbeeld het elektro- of oxistaalproces.
- *Gesmeed staal.* Wanneer vloeistaal opnieuw wordt verwarmd en uitgesmeed om er smeedstukken van een gewenste vorm van te maken, spreekt men van rond 1870 tot 1900 van gehamerd gietstaal. Omstreeks 1911 gebruikt men de benaming gesmeed gietstaal. Rond 1920 kwam de naam gesmeed staal in gebruik. Na 1930 spreekt men uitsluitend van smeedstaal.

koolstof	0,02 - 0,07%
mangaan	0,03 - 0,16%
silicium	0,10 - 0,20%
fosfor	0,18 - 0,56%
zwavel	0,01 - 0,035%
stikstof	0,02 - 0,005%

Voor wat betreft de sterkte vond men de volgende waarden:

	langs-richting	dwars-richting
vloeigrens (N/mm²)	210-350	190-290
treksterkte (N/mm²)	270-450	190-330
rek (%)	2-29	0-8

Opvallend is de grote spreiding in de rek. De meetlengte is gelijk aan 10 maal de dikte van het materiaal. Voor de elasticiteitsmodulus van welijzer wordt in het algemeen aangehouden 200.000 N/mm² [15], hoewel er ook lagere waarden worden genoemd van 170.000 N/mm² [9], onder meer voor platen. Als elasticiteitsgrens geeft [15] een waarde aan van 130-170 N/mm².

Welijzer heeft een geringe weerstand tegen stootbelasting. De resultaten van kerfslagproeven, uitgevoerd bij +20 °C, geven waarden te zien van 12-18 J. Voor bruggen wordt tegenwoordig voor staal S235J0 een waarde van 28 J geëist. Het blijkt dat bij welijzer de temperatuur een geringe invloed heeft op de uitkomst van de kerfslagproeven.

Lassen

Kenmerkend voor welijzer is het hoge fosforgehalte. Omdat er bovendien dikwijls sprake is van een lage rek, is het materiaal nauwelijks geschikt voor gelaste constructies, waarbij eisen aan de sterkte worden gesteld. Als er bij minder belangrijke constructies toch aan welijzer wordt gelast, is het van belang te onderkennen dat de sterkte van de lasverbinding loodrecht op het oppervlak gering is. Dat komt door de gelaagde structuur van welijzer. Deze structuur kan worden herkend na het breken van een gekerfd stukje van dit materiaal.

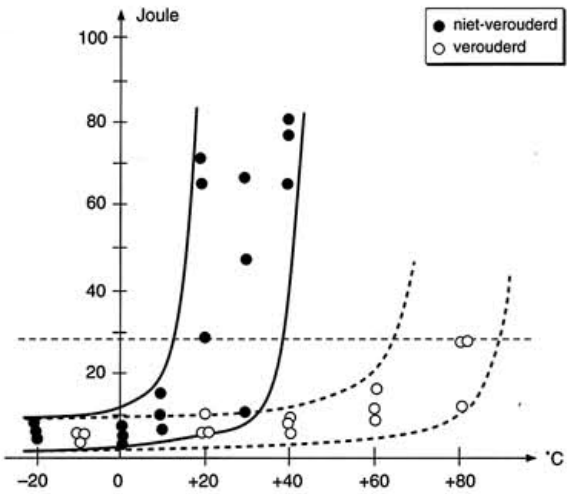
Bessemer-staal

In de *Verhandelingen van het KIvI* doet ingenieur J. Schroeder van der Kolk in 1902 verslag van een onderzoek naar de problemen met het Bessemer-staal, dat in de tweede helft van de 19e eeuw voor spoorbruggen in Nederland werd toegepast [13]. Bij dit onderzoek zijn monsters van een aantal van deze bruggen onderzocht. In de bestekken werd destijds een treksterkte van 600 N/mm² voorgeschreven met een rek van ten minste 17%. De resultaten van trekproeven lieten een grote spreiding zien: een treksterkte van 450-870 N/mm² en een rek van 6-28%. Het onderzoek omvatte ook een chemische analyse van 62 monsters, waarbij nog specifiek is gekeken naar monsters van bruggen, waarbij scheuren waren ontstaan:

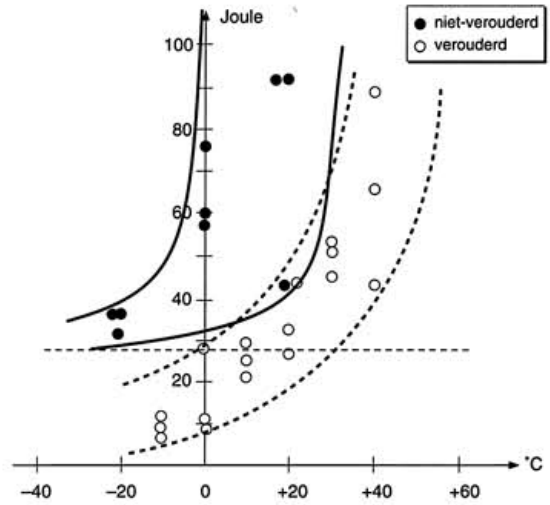
	alle monsters	gescheurd
koolstof	0,04-0,67%	0,22-0,67%
mangaan	0,18-1,19%	0,36-0,80%
silicium	0,02-0,87%	0,05-0,87%
fosfor	0,05-0,34%	0,09-0,17%

Rond 1970 is een monster geanalyseerd van de spoorbrug over de Waal bij Nijmegen. Van dit Bessemer-staal werd behalve het gehalte van de elementen C, Mn, Si en P ook het stikstofgehalte bepaald. Dat bedroeg 0,020%.

Uit deze chemische analyses blijkt een zeer ongelijkmatige samenstelling. Het koolstof- en stikstofgehalte is dusdanig hoog



Vergelijk van kerfslagproeven (Charpy-V) op niet-verouderd en verouderd Thomas-vloeiijzer (1907). 5% gestuikt en half uur gegloeid op 250 °C.



Vergelijk van kerfslagproeven (Charpy-V) op niet-verouderd en verouderd constructiestaal Fe 360C (S235J0) (1975): 5% gestuikt en een uur gegloeid op 250 °C.

dat hieruit de ondervonden brosheid kan worden verklaard en toegeschreven moet worden aan veroudering. Naar alle waarschijnlijkheid heeft ook het hoge fosforgehalte bijgedragen aan de brosheid van het materiaal.

Lassen

Door het hoge gehalte aan koolstof en andere elementen is dit Bessemer-staal niet lasbaar.

Thomas-vloeiijzer

Het doorblazen van lucht door het vloeibare ijzer kan bij het Thomas-proces niet zover worden doorgezet dat alle fosfor wordt verbrand. Bij te lang doorblazen ontstaat er gevaar voor verbranding van het ijzer. In het eindprodukt van het destijds toegepaste Thomas-proces zal altijd een fosforgehalte van 0,06-0,12% aanwezig zijn. Na het doorblazen met lucht bedraagt het stikstofgehalte 0,015-0,025%. Dit gehalte aan stikstof is dusdanig hoog dat het materiaal gevoelig is voor veroudering met kans op brosse breuk. Dit verschijnsel wordt versterkt door het hoge gehalte aan fosfor.

Omstreeks 1975 zijn de eigenschappen van het tussen 1850 en 1950 voor spoorbruggen toegepasteThomas-vloeiijzer door de Nederlandse Spoorwegen onderzocht [32]. Een chemische analyse van 51 monsters leverde het volgende resultaat:

koolstof	0,02 - 0,10	%
mangaan	0,30 - 0,50	%
silicium	sporen	
fosfor	0,04 - 0,12	%
zwavel	0,02 - 0,11	%
stikstof	0,010 - 0,023	%

Uit het feit dat slechts sporen silicium konden worden aangetoond, blijkt dat het materiaal niet is gekalmeerd. Dit geldt overigens voor nagenoeg al het Thomas-vloeiijzer dat tussen 1890 en ongeveer 1950 voor gebouwen en bruggen is gebruikt.

Voor het onderzoek naar de gevoeligheid voor het bros breken zijn kerfslagproeven uitgevoerd. De kerfslagwaarde bij de onderzochte temperaturen vertonen een grote spreiding. Bovendien ligt een groot deel van de resultaten onder de voor modern constructiestaal vereiste grens van 28 J. De overgangstemperatuur ligt rond +20 °C. Bij een verouderingsproef bleek een grote terugval in de kerfslagwaarde.

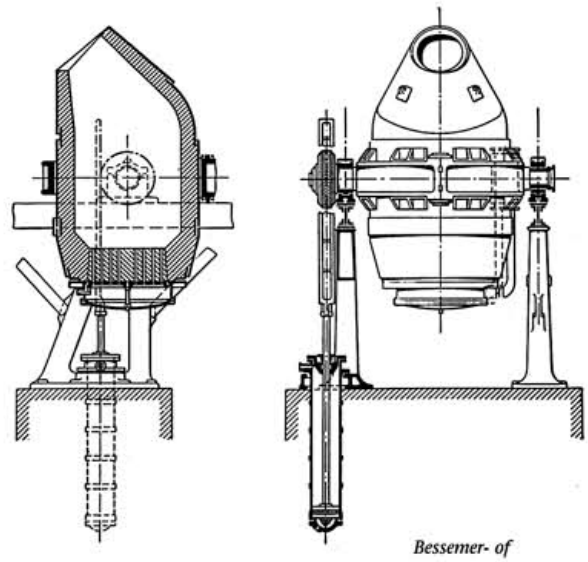
Het onderzochte Thomas-vloeiijzer voldoet niet aan de huidige normen voor constructiestaal voor bruggen. Het moet worden gekwalificeerd als een staalsoort, bedoeld voor statisch belaste constructies, waaraan geen hoge eisen mogen worden gesteld. De gegevens van de overige mechanische eigenschappen van het Thomas-vloeiijzer zijn ontleend aan een Duits onderzoek uit 1890 [11, 12, 24]. De resultaten hierbij waren:

vloeigrens	240 - 340	N/mm²
treksterkte	390 - 440	N/mm²
rek	20 - 34	%

Omstreeks 1911 vermelden de handboeken voor de elasticiteitsgrens 200-240 N/mm² en voor de elasticiteitsmodulus 215.000 N/mm² [15].

Lassen

Door het hoge stikstofgehalte, dat meestal gepaard gaat met een hoog fosforgehalte, is het ongekalmeerde Thomas-vloeiijzer gevoelig voor veroudering en

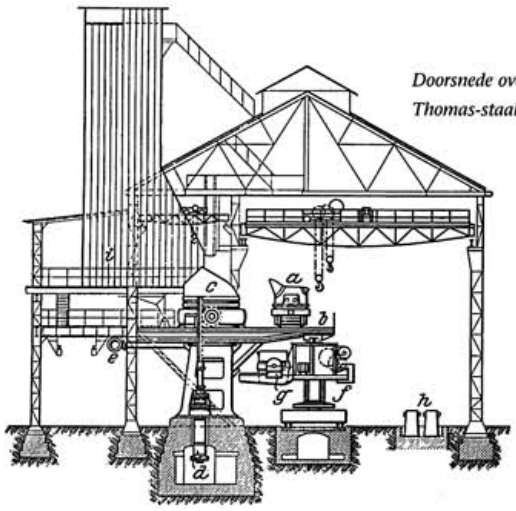


Bessemer- of Thomasconvertor.

Bessemer-staal

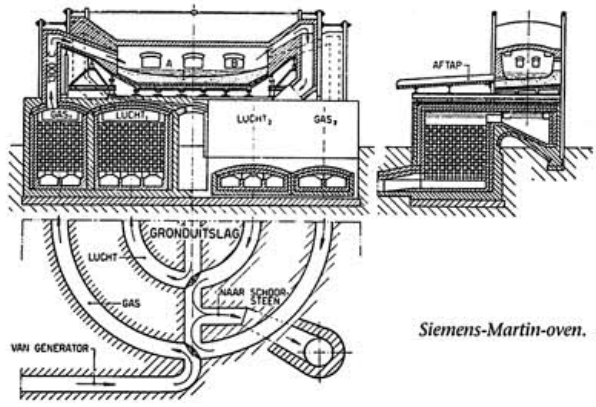
Henry Bessemer vond in 1855 een methode om smeedbaar ijzer direct uit ruwijzer te maken door lucht in te blazen vanaf de bodem van een peervormig vat (convertor). In dit vat was het vloeibare ruwijzer uit de hoogoven opgevangen. Deze methode betekende een grote omwenteling, omdat hiermee op een eenvoudige wijze grote hoeveelheden homogeen en slakkenvrij smeedbaar ijzer en staal konden worden geproduceerd. De toegepaste vuurvaste bekleding van het vat kon echter geen fosfor binden. Daardoor was het Bessemer-proces uitsluitend geschikt voor het verwerken van ruwijzer verkregen uit fosforarme ertsen.

Het Bessemer-proces is eigenlijk het meest geschikt om staal te maken, omdat het eindprodukt van nature een hoger koolstofgehalte heeft. In Nederland is Bessemer-staal bekend geworden door de toepassing voor onderdelen van een aantal spoorbruggen die tussen 1865 en 1880 zijn gebouwd. Omdat Bessemer-staal bros bleek, is het na 1880 niet meer als constructiestaal voor bruggen toegepast.

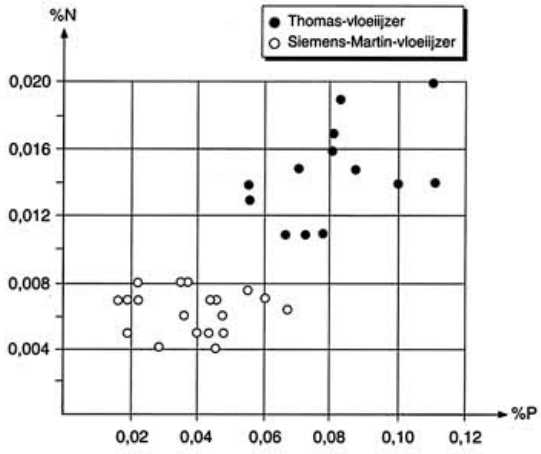


Doorsnede over een Thomas-staalfabriek.

a ruwijzer-gietpan
b converter-steiger
c converter
d hydraulische kip-inrichting
e windleiding
f gietwagen
g staal-gietpan
h gietkuil met vormen



Siemens-Martin-oven.



Gehalte aan stikstof en fosfor in Thomas-vloeijzer en Siemens-Martin-vloeijzer.

Thomas-staal

Het materiaal met een treksterkte van ongeveer 350 N/mm² werd voor 1930 Thomas-vloeijzer genoemd en daarna Thomas-staal. Evenals bij het Bessemer-proces wordt bij het Thomas-proces in een convertor lucht geblazen door een smeltbad van ruwijzer, dat uit de hoogoven komt. In 1878 ontdekte Sidney Gilchrist Thomas dat het mogelijk was ruwijzer afkomstig van fosforrijk ijzererts te verwerken. Hij gebruikte daarvoor een basisch reagerende bekleding van de convertor, in combinatie met een kalktoeslag aan het smeltbad. Een groot voordeel van dit proces was, dat het ook zeer geschikt is om naast staal, vooral smeedbaar ijzer met een laag koolstofgehalte (constructie-ijzer) te produceren. Voor het produceren van staal was het Bessemer-proces meer geschikt. Vanaf omstreeks 1880 werd het Thomas-proces op grote schaal tot ver in de 20e eeuw toegepast.
Een nadeel was dat door het inblazen van lucht er in het Thomas-vloeijzer een naar verhouding hoog stikstofgehalte ontstond, waardoor het gevoelig werd voor brosse breuk. Door de nogal heftig verlopende reacties, zeker in de beginperiode, had men het proces niet altijd goed in de hand. Zowel het stikstofgehalte als het fosforgehalte kon hoog oplopen, hetgeen het gevaar voor brosse breuk vergrootte.

niet geschikt voor het lassen van belangrijke constructies. Bij het ongekalmeerde Thomas-vloeijzer is ook sprake van een sterke segregatie, waarbij zich een concentratie van fosfor en zwavel voordoet in de kern van de doorsnede. Wanneer bij ondergeschikte constructies toch aan Thomas-vloeijzer wordt gelast, moet worden vermeden dat lasmateriaal in aanraking komt met de segregatiezone. Dit is bijvoorbeeld mogelijk, wanneer uitsluitend aan de buitenrand van een profiel behoeft te worden gelast. Als een stompe las nodig is, moet het materiaal als niet-lasbaar worden beschouwd.

Siemens-Martin-vloeijzer

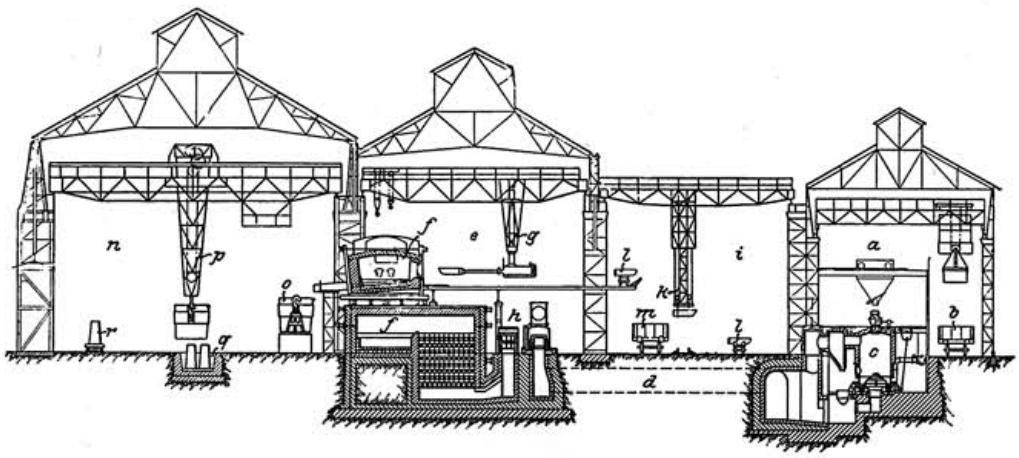
Door het rustige verloop van het Siemens-Martin-proces is dit vloeijzer meer gelijkmatig van samenstelling dan het Thomas-vloeijzer. De ontkoling vindt plaats door een vlam die over het smeltbad strijkt, waardoor het stikstofgehalte van het eindprodukt laag is: 0,004-0,010%. Het ijzeroxide (FeO) wordt tijdens het bereidingsproces gereduceerd door het toevoegen, in het smeltbad, van ferrosilicium of ferromangaan. Daardoor verloopt het stollen na het uitgieten van het vloeibare materiaal in de coquilles rustiger en is er sprake van minder segregatie.
Bij het onderzoek van de Nederlandse Spoorwegen rond 1975 [32] zijn voor het toegepaste Siemens-Martin-vloeijzer de volgende waarden gevonden:

	niet gekalmeerd (32 monsters)	gekalmeerd (4 monsters)
koolstof	0,03–0,19%	0,14–0,16%
mangaan	0,35–0,52%	0,35–0,52%
silicium	sporen	0,14–0,33%
fosfor	0,012–0,067%	0,016–0,024%
zwavel	0,021–0,152%	0,022–0,040%
stikstof	0,004–0,009%	0,005–0,007%

Vergeleken met de resultaten van de proeven met het Thomas-vloeijzer, heeft het Siemens-Martin-vloeijzer een lager gehalte aan fosfor en aan stikstof; het koolstofgehalte is enigszins hoger. In de meeste gevallen zijn slechts sporen silicium gevonden. Hieruit kan worden geconcludeerd dat het Siemens-Martin-vloeijzer voor 1940 meestal niet werd gekalmeerd. In de gevallen waarbij wel silicium is aangetoond, is er waarschijnlijk wel gekalmeerd. De vloeigrens, de treksterkte en de rek van het Siemens-Martin-vloeijzer komen nagenoeg overeen met die van het Thomas-vloeijzer. Hetzelfde geldt voor de elasticiteitsgrens en de elasticiteitsmodulus.
Bij het onderzoek van de NS zijn ook kerfslagproeven uitgevoerd op monsters ongekalmeerd Siemens-Martin-vloeijzer, afkomstig van bruggen gebouwd tussen 1900 en 1920. Een groot deel van de kerfslagwaarden ligt onder de voor modern constructiestaal voor bruggen vereiste grens van 28 J. De overgangstemperatuur lag tussen ongeveer 0 °C en +30 °C.

Lassen

Door het lage gehalte aan fosfor en stikstof is het Siemens-Martin-vloeijzer in het algemeen goed lasbaar, mits het zwavelgehalte niet te hoog is. Bij oud, ongekalmeerd Siemens-Martin-vloeijzer kunnen echter hoge gehalten zwavel en fosfor voorkomen evenals segregatiezones. Het materiaal is dan niet goed lasbaar.



Dwarsdoorsnede over een Siemens-Martin-staalfabriek.

a gasfabriek
b kolenaanvoer
c gasretort
d gaskanaal
e ovenhuis
f Siemens-Martin-oven
g laadmachine
h wisselkleppen
i schrootopslag
k schrootkraan
l transporttrog
m schrootaanvoer
n gietbal
o gietpan
p gietkraan
q gietkuil met vormen
r wagen met vormen

Literatuur

1. D. Grothe, *Het ijzer, zijne bewerking. Eigenschappen en toepassing*, 's Gravenhage 1873.
2. J.A. van der Kloes, *Onze bouwmaterialen. Deel V. Metalen*, Maassluis ca 1909 (2e druk), Amsterdam 1925 (3e druk).
3. L.A. van Royen en I.P. de Vooys, *Leerboek der mechanische technologie*. Deel I. Metalen, Gorinchem 1916 (2e druk), 1922 (4e druk).
4. A.G. van den Hoek en H.J. Mathlener Loderus, *Metalen en legeringen*, Rotterdam 1938 (2e druk).
5. H. Felix, *Mechanische technologie*, Deventer 1939 (3e druk).
6. P. Jongenburger, *Kennis der metalen*, Delft 1966 (8e druk).
7. G. den Ouden en B.M. Korevaar, *Metaalkunde*. Deel 1, Delft 1991.
8. B.M. Korevaar en G. den Ouden, *Metaalkunde*. Deel 2, Delft 1991.
9. J.L. Schneitter en G. van Diesen, 'Theorien en beschouwingen over de bouw van ijzeren spoorwegbruggen', *Verhandelingen van het KIvI* 1860/1861, p. 95 en p. 117-122.
10. M. van Ruth, 'Verslag betreffende uitkomsten van proeven met ijzer geleverd door verschillende fabrikanten voor eenige der werken bij den aanleg der Nederlandsche Staats-Spoorwegen', *Verhandelingen van het KIvI* 1881/1882, p. 1-47.
11. G.B.H.F. Alpherts en J. Verbrugh, 'Over het gebruik van vloeiijzer in bouwconstructies', *Verhandelingen van het KIvI* 1891/1892, p. 276-340.
12. G.B.H.F. Alpherts en J. Verbrugh, 'Vloeiijzer voor bouwconstructies', *Verhandelingen van het KIvI* 1892/1893, p. 229-279.
13. J. Schroeder van der Kolk, 'Over het onderzoek van het Bessemerstaal, dat in onze spoorwegbruggen is verwerkt en over de nieuwe methoden van onderzoek van ijzer en staal volgens de mededelingen op het congres te Budapest (1901)', *Verhandelingen van het KIvI* 1901/1902, p. 148-180.
14. P. Combaz, *La construction, principes et applications*, Bruxelles 1895, p. 329-331.
15. *Bernoulli's Vademecum*, Amsterdam 1911, p. 209.
16. J. Oosterhoff, G.J. Arends, C.H. van Eldik en G.G. Nieuwmeijer, *Constructies van ijzer en beton* (Bouwtechniek in Nederland 1). Delft 1988, p. 81-88.
17. 'Algemeene Voorschriften voor IJzer 1900', *De Ingenieur* (1900), p. 742-745.
18. *Algemeene Voorschriften voor IJzer* 1911, bijlage T van het Koninklijk Instituut van Ingenieurs.
19. Hoofdcommissie voor de Normalisatie in Nederland, *Bijzondere Voorschriften voor IJzer* 1922.
20. *Normblad N702* (Staal gewalst of gesmeed), 1932.
21. *Normblad N709* (Gietstaal), 1933.
22. *Normblad N715* (Gietijzer), 1933.
23. E.H. Schulz en W. Bischof, 'Zusammensetzung und Festigkeit von Brückenbaustählen aus der Zeit 1870 bis 1880', *Stahl und Eisen* 73 (1953) 24, p. 1583-1590.
24. G.C. Mehrtens, 'Einiges über die Prüfung des Fluszeisen-Materials der Fordoner Weichselbrücke', *Stahl und Eisen* 12 (1892) 13, p. 593-598.
25. A. Frey en R. Kapplein, 'Beitrag zum rechnerischen Nachweis der Tragfähigkeit alter Biegeträger aus Guszeisen', *Der Stahlbau* 62 (1993) 28, p. 221-230.
26. H. Nieswaag, *Elastisch en plastisch gedrag van grijs gietijzer*, collegedictaat TU Delft (MK 59-1 Gietijzer), z.j.
27. G. Tutzschky, 'Versuche zur Bestimming der Materialeigeschaften an alten Brückenstählen', *Signal uns Schiene* 5 (1967), p. 187-191.
28. G. Steidl, 'Schweiszverhalten von Baustählen aus der Zeit von 1885 bis 1940', *Schweiszen und Schneiden* 24 (1972) 3, p. 85-87.
29. R. Killing, 'Was ist beim Schweiszen unberuhigter Stähle zu beachten?', *Der Praktiker* 11 (1974), p. 250-251.
30. F. Mang, G. Steidl en O. Bucak, 'Altstahl im Bauwesen', *Schweiszen und Schneiden* 37 (1985) 1, p. 10-14.
31. A. de Visser, *Electrisch booglassen (Smit Nijmegen)*, z.pl. z.j., p. 317-324.
32. Centrum voor Technisch Onderzoek van de Nederlandse Spoorwegen, niet gepubliceerde rapporten.

Siemens-Martin-staal

Het Siemens-Martin-proces, ook wel open-haard proces genoemd, is verwant aan het puddelproces. Emile en Pierre Martin kwamen in 1864 op het idee het systeem van de oven toe te passen dat Siemens eerder voor het smelten van glas had ontwikkeld. Hiermede kon een hoge temperatuur worden bereikt en werd het mogelijk, behalve ruwijzer, ook schroot in de oven te verwerken.

Evenals in de puddeloven vindt de raffinage plaats door een reducerende vlam die over het ruwijzer strijkt. Echter met dit verschil dat het ijzer nu vloeibaar wordt. Als brandstof wordt een mengsel van gas en lucht gebruikt. Voordat dit mengsel in de oven verbrandt, wordt het door de hete afvoergassen eerst voorgewarmd in een stelsel van toe- en afvoerkanalen. Aanvankelijk had de oven een zure bekleding. In 1882 werd het basische proces ingevoerd, waarbij de oven is bekleed met dolomiet en waarbij kalk aan de smelt wordt toegevoegd.

Het Siemens-Martin-proces verloopt veel rustiger en langzamer dan het Thomas-proces. Hierdoor is het geproduceerde ijzer meer gelijkmatig van samenstelling met een constante kwaliteit. De eerste grote brug waarvoor dit materiaal in Nederland is gebruikt, was de omstreeks 1900 gebouwde spoorbrug over de IJssel bij Westervoort.