

ANVÄNDNING AV ÅTERBRUKAT STÅL TILL BÄRANDE KONSTRUKTIONER



Wylliam Husson

2022-02-08

Förord

Denna rapport presenterar resultaten av ett pilotprojekt som drevs av Skanska Sverige AB under andra halvan av 2021 i samarbete med Stena Stål AB och med finansiering av SBUF.

Projektets arbetsgrupp bestod av:

Anders Carlsson Jürke, Konstruktion och Byggfysik, Skanska Sverige AB
Adam Nilsson, Hållbarhetspecialist, Skanska Sverige AB
Marina Gasparius, Hållbarhetschef, Stena Stål AB
Christoffer Muhl, Kvalitetskoordinator, Stena Stål AB
Wylliam Husson, Specialist inom stålbyggnad, ProDevelopment AB
Yezelkal Adamu, U.R. Plåt och Smide AB

För sitt deltagande i referensgruppen och värdefulla diskussioner vill vi tacka:

Emma Evers Holm, Familjebostäder, projektledare
Madeleine Nobs, chef hållbar affärsutveckling, NCC
Roger Persson, chef inköp stommar, NCC
Wall Louise, Gruppchef på teknik och hållbarhet, NCC
Peter Arvidsson, projektchef för ombyggnaden av Onsala rymdobservatorium, NCC
Pär Johansson, projektutvecklare, Chalmersfastigheter
Nadine Aschenbach, Codesign, projektledare Återhus
Jelena Mijanović, Codesign, projektledare Återhus
Claes Dalman, ansvarig FoU, PEAB
Björn Uppfeldt, förbundsdirektör, MVR
Douglas Wallding, VD och teknisk chef, Nordcert
Ulla Janson, universitetslektor, LTH
Ove Lagerqvist, professor i stålbyggnad, ProDevelopment AB
Jens-Erik Jörgensen, gruppchef byggfysik, Skanska
Sten Nilsson, specialist konstruktion, Skanska
Jonas Ohlsson, chef inköp stommar, Skanska
Anna Haraldson Jensen, hållbarhetsutvecklare, Stena fastigheter

Söderhamn,

Februari 2022

Innehållsförteckning

1	Inledning.....	4
2	Beskrivning av återbruksprojektet	5
3	Praktiska erfarenheter och reflexioner	8
3.1	Projektering.....	8
3.2	Tillverkning och montering.....	8
3.3	Demontering.....	8
3.4	Logistik.....	8
4	Kvalitetssäkring.....	10
5	Klimatpåverkan.....	12
5.1	Miljövarudeklarationer (EPD).....	12
5.2	Klimatdeklarationer	14
5.3	Klimatpåverkan och överdimensionering	14
6	Ekonomi.....	17
6.1	Inkomster	17
6.2	Kostnader	17
6.2.1	Inköpspris	17
6.2.2	Provning.....	19
6.2.3	Transport	21
6.2.4	Rekonditionering.....	21
6.2.5	Lagring	21
6.3	Sammanfattning.....	21
7	Slutsatser	23
8	Referenser	24

Sammanfattning

Detta pilotprojekt initierat av Skanska och Stena Stål hade som syfte att undersöka hur återbruk av stål kan göras praktiskt, miljömässigt och ekonomiskt gångbart.

Skanska valde ett enkelt byggprojekt i form av ett fläktrum vars stålkonstruktion utfördes av återbrukat stål som levererades efter kvalitetssäkring av Stena Stål.

Handbok MVR BS04:2021 erbjuder en praktiskt tillämpbar lösning för sortering och klassificering av profiler med känt ursprung tillverkade efter 1971 och projektet visar hur de generella rekommendationerna kan omvandlas till egna rutiner med specifika acceptanskriterier kopplade till bl.a. den utrustning som används.

Viktiga erfarenheter från projektet är att:

- Rekommendationer för bearbetning av ytor inför oförstörande provning kan avvika från DIN 50159 om detta har stöd i specifika testresultat;
- Mer avancerad analys t.ex. med Q-Q diagram rekommenderas för att säkerställa en kontrollgrupps homogenitet, och;
- Profilen med lägst hårdhet bör väljas som representativ för en kontrollgrupp vid förstörande provning.

Genom att säkerställa de väsentliga egenskaperna enligt SS-EN 1090-2 kan återbrukade profiler vara ingående produkter till en CE-märkt konstruktion. I så fall styrks egenskaperna av ett provningsintyg vars egenskaper jämförs med de som föreskrivs i komponentspecifikationen. Provningsintyget bifogas till prestandadeklarationen istället för tillverkarens inspektionsdokument.

Återbrukat stål har nära noll utsläpp per massenhet. Om nya profiler ersätts av återbrukade blir det konstruktörens ansvar att inte använda mer material än nödvändigt, även om den totala klimatpåverkan förbli liten. Vi rekommenderar att inte ersätta nya profiler med återbrukade om vikten ökar med mer än 50%.

Vid Kvalitetssäkring av profiler genom gruppering med procedur B i MVR BS04:2021 är provningskostnader i storleksordning 2 till 3 kr/kg och uppskattningsvis ca 20 % av totalkostnaden som hamnar strax under priset för nytt stål. Återbruk av stålkomponenter är kommersiellt möjligt.

1 Inledning

Återbruk av stål kan bidra till att reducera byggsektorns energianvändning och koldioxidutsläpp. Fallstudier visar att det även kan bli till en praktisk och kostnadseffektiv tillämpning i vissa fall. Trots detta är återbruk av stål fortfarande sällsynt. De största hindren som nämns är kostnader, tillgång och kvalitet.

I SBUF-rapporten "Återbruk av stålkomponenter - Analys av möjligheter och hinder för en ökad återanvändning idag" (ID 13488) föreslogs att fortsatt arbete borde inkludera vidareutveckling av provningsprocedurer med definierade acceptanskriterier och provningsomfattningar, utveckling av en prospekteringsmetodik som kan bidra till en ökande tillgång av återanvända produkter och utveckling av metoder som gör det möjligt att tillgodoräkna sig miljöfördelarna av att utnyttja återanvända produkter.

Detta pilotprojekt initierat av Skanska och Stena Stål hade som syfte att undersöka hur återbruk av stål kan göras praktiskt, miljömässigt och ekonomiskt gångbart.

Skanska valde ett enkelt byggprojekt vars stålkonstruktion utfördes av återbrukat stål som levererades efter kvalitetssäkring av Stena Stål. Projektet beskrivs i kapitel 2.

Praktiska erfarenheter och reflexioner m h t projektering, tillverkning och logistik har samlats i kapitel 3. Tyvärr utelämnades demontering pga. tidsbegränsningar och brist på passande rivningsobjekt.

Mekaniska Verkstädernas Riksförbund tillsammans med Nordcert och ProDevelopment AB har tagit fram en handbok om återbruk av stål i bärande konstruktioner som ger instruktioner för sortering och klassificering av stålkomponenter.

Denna handbok tillämpades för stål med känt ursprung tillverkat efter 1971 (Procedur B) och specifika rutiner för bestämning av stålkomponenters väsentliga egenskaper utvecklades. Resultaten sammanfattas i kapitel 4 och redovisas mer utförligt i bakgrundsdocumentet i Bilaga A

Rutinerna och bakgrundsdocument granskades och godkändes av RiSE, se utlåtande i Bilaga B.

Vidare ges ett exempel på provningsintyg i Bilaga C.

Hänvisningar för bedömning och hantering av klimategenskaper hos återbrukat stål ges i kapitel 5. Där hanteras även frågan om överdimensionering och/eller nedgradering av återbrukat stål.

Slutligen uppskattas möjliga inkomster och kostnader för återbrukat stål i kapitel 6. Projektet bidrog med information om framförallt provning medan andra uppskattningar baseras på färsk forskningresultat.

2 Beskrivning av återbruksprojektet

Konstruktionen som utfördes i återbrukat stål är en del av ett fläktrum uppe på ett av Stockholmshusen (flerbostadshus) som Skanska bygger åt Familjebostäder i Farsta, Stockholm, figur 2-1.

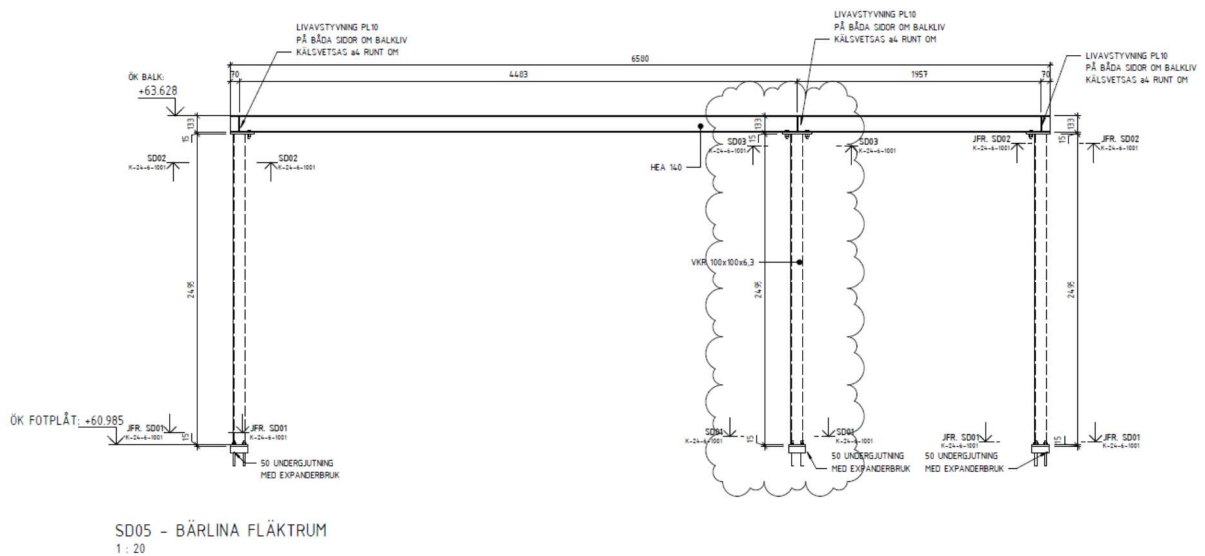


Figur 2-1 Stockholmshus i Farsta under uppförande.

Den består av en enkel ram med tre pelare och en kontinuerlig balk (bärlina) samt en högre självstående pelare (nockpelare) som bär takets träkonstruktion.

Konstruktionen projekterades innan det bestämdes att återbrukat material skulle användas varpå Stena Stål fick i uppdrag att leta efter lämpliga profiler. Det var tyvärr inte möjligt att hitta exakt de profiler som konstruktören valde och därför fick konstruktionen ritas om och bla detaljer anpassades till tillgängliga profiler.

Ursprungligen var pelarna av kallformade konstruktionsrör, VKR 100x100x6,3, och bärlinan av varmvalsad H-balk, HEA 140. Samtliga var av konstruktionsstål S355 vilken är den vanligaste stålsorten som lagerhålls i Sverige idag, se figur 2-2.

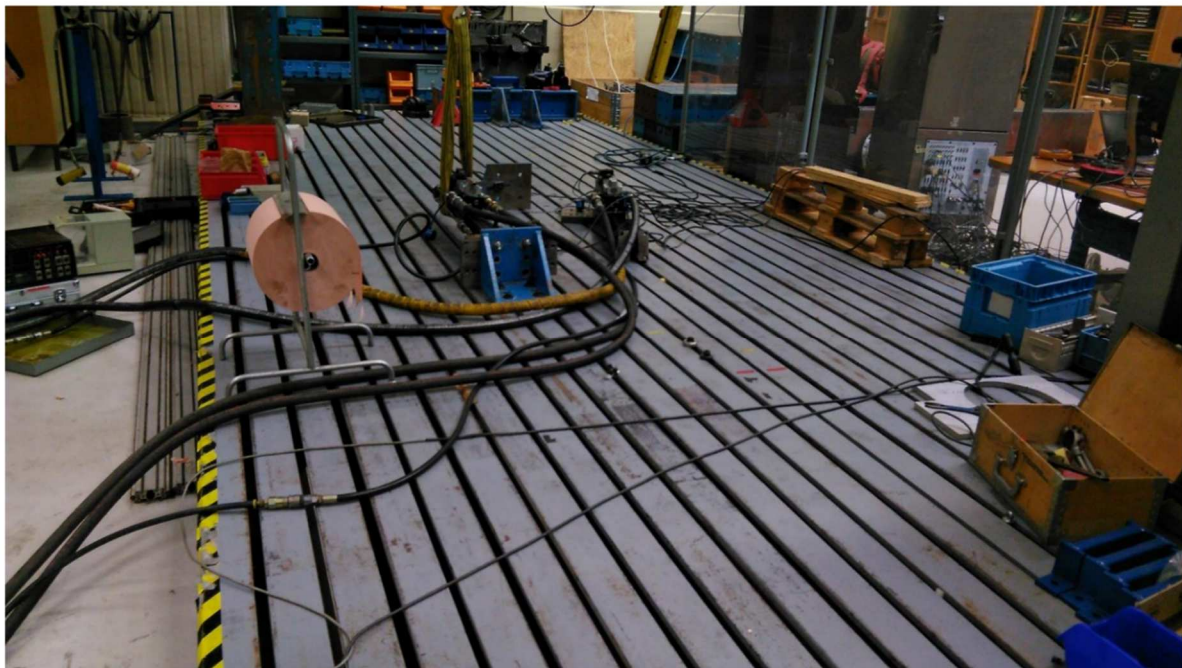


Figur 2-2 Utdrag ur bygghandlingsritning som visar bärlinans ursprungliga utformning.

Tabell 2-1 Materiallista till den ursprungliga utformningen.

Beteckning	Antal	Profil	g [kg/m]	Längd [mm]	Total vikt [kg]
Bärlina	1	HEA 140	24,7	6580	162,5
Pelare	3	VKR 100x100x6,3	18,2	2495	136,2
Nockpelare	1			4345	79,1
Σ					377,8

Stena Stål hittade varmvalsade H-balkar som använts som testbord hos ett labb i Hisings Backa sedan 1990-talet, figur 2-3.



Figur 2-3 Testbord av H-balkar

De återbrukade profilerna var varmvalsade H-balkar, HEM 120, med längd på 6,0 m av stålsort S235.

Både pelare och balk gjordes av samma profil, se figur 2-4.



Figur 2-4 Konstruktion av återbrukade profiler efter montage

Eftersom balkarna var för korta utfördes bärlinan i två stycken med stöd på mittpelaren, se figur 2-5.



Figur 2-5 Delad bärlina med skarv över mittstödet.

Tabell 2-2 Materiallista till den slutliga utformningen med återbrukat stål.

Beteckning	Antal	Profil	g [kg/m]	Längd [mm]	Total vikt [kg]
Bärlina 1	1	HEM 120	52,1	4570	238,1
Bärlina 2	1			2000	104,2
Pelare	3			2488	388,9
Nockpelare	1			4345	226,4
Σ					957,5

3 Praktiska erfarenheter och reflexioner

3.1 Projektering

Konstruktionen projekterades från början med nya profiler och passande ersättningsprofiler efterlystes under tidspress då byggprojektet inte fick försenas. De återbrukade profilerna som hittades krävde att konstruktionen projekterades på nytt och detta ledde till en inte obetydlig övervikt jämfört med den ursprungliga lösningen. Konsekvenserna för konstruktionens klimategenskaper behandlas i avsnitt 5.3

Omprojekteringen däremot medförde inga särskilda svårigheter i sig då konstruktionen i fråga var av enkel sort. Det handlade om ett fåtal knutpunkter som ritades om. Återbruk kommer antagligen att kräva ett högre mått av flexibilitet vid projektering/dimensionering för att anpassa konstruktionen till det tillgängliga materialet. Att efterlysa profiler med kort varsel som det var fallet i detta projekt lär dock inte vara framgångsrikt i större skala. Helst bör återbruksprocessen innehålla någon form av lagerhållning för att kunna erbjuda den framförhållning som krävs i byggprojekt där tidsplaner ska hållas utan att behöva överdimensionera.

De återbrukade profilerna hade större tvärsnitt och krävde ingen särskild stålsort, varken gällande sträck- och brottgräns (S235 tillräcklig) eller brottseghet (konstruktion inomhus). Därmed var en nedgradering av profilerna till S235JR möjlig. Detta ger en viss fördel i projekt med korta ledtider då osäkerheten gällande provningsresultat utgår. Däremot försämras klimategenskaper.

3.2 Tillverkning och montering

De återbrukade profilerna levererades till smeden kapade till rätt längd men annars i befintligt skick, dvs med ursprungligt rostskydd. Detta försvårade arbetsflödet i verkstad eftersom färgen behövde slipas eller brännas bort manuellt före svetsning. Förutom ett extra arbetsmoment är detta även en arbetsmiljöfråga pga rökutveckling mm. Om kunden inte uttryckligen vill hantera rekonditionering av återbrukade profiler är det vår uppfattning att leverantören bör se till att leverera produkter som är likvärdiga nya, dvs kapade och blästrade. Detta lär minska störmomenten och även förmedla känslan av en kvalitetsprodukt och rättfärdiga ett lika högt pris som nytt stål.

Återbruksprojektet ingick i ett större projekt där flera hus av samma typ byggdes. Vid montage orsakade avvikelser från standardlösningen vissa fel vid utsättning av grundskruvar. Detta kunde avhjälpas utan större problem men understryker vikten att kommunicera ändringar mellan involverade parter, speciellt när sådana förutsätts pga återbruk. Återigen kan denna typ av fel minska med bättre framförhållning och mindre tidspress.

3.3 Demontering

Demontering i detta projekt var inte representativ av vanliga fall då balkarna användes liggande som ett testbord, se figur 2-3. Vi kan därför inte presentera några slutsatser om denna aspekt.

3.4 Logistik

Transporter hanterades för det mesta av Stena Stål inom sina ordinarie turer. Först hämtades samtliga profiler i Hisings Backa och fraktades till Stena Ståls filial på von Utfallsgatan i östra Göteborg (sträcka på ca. 7 km) där de testades. Två mindre provbitar skickades till RISE i Borås (sträcka på ca 64 km) för förstörande provning. Sedan transporterades profilerna avsedda för byggprojektet (ca 1 ton) till Stenkullen utanför Göteborg för kapning (sträcka på ca 23 km). Därifrån skickades de kapade profilerna

till UR Smide i Huddinge med ett logistikföretag (delad last på ca 1 ton och sträcka på 456 km). Transporterna medförde inga svårigheter och går antagligen att hanteras inom ordinarie turer vid mindre mängder. Transportsträckorna i detta projekt var särskilt korta och kan inte anses som representativa. Antagande gällande detta samt kostnadsuppskattningar tas upp i avsnitt 6.2.3.

Vid kommersiellt återbruk bör leverantören ansvara för rekonditionering, se 3.2, så behov av transport till kapning och blästring försvinner. Även frakt till provning kan optimeras. I fortsättningen försummas dessa vad gäller både kostnader och klimatpåverkan.

4 Kvalitetssäkring

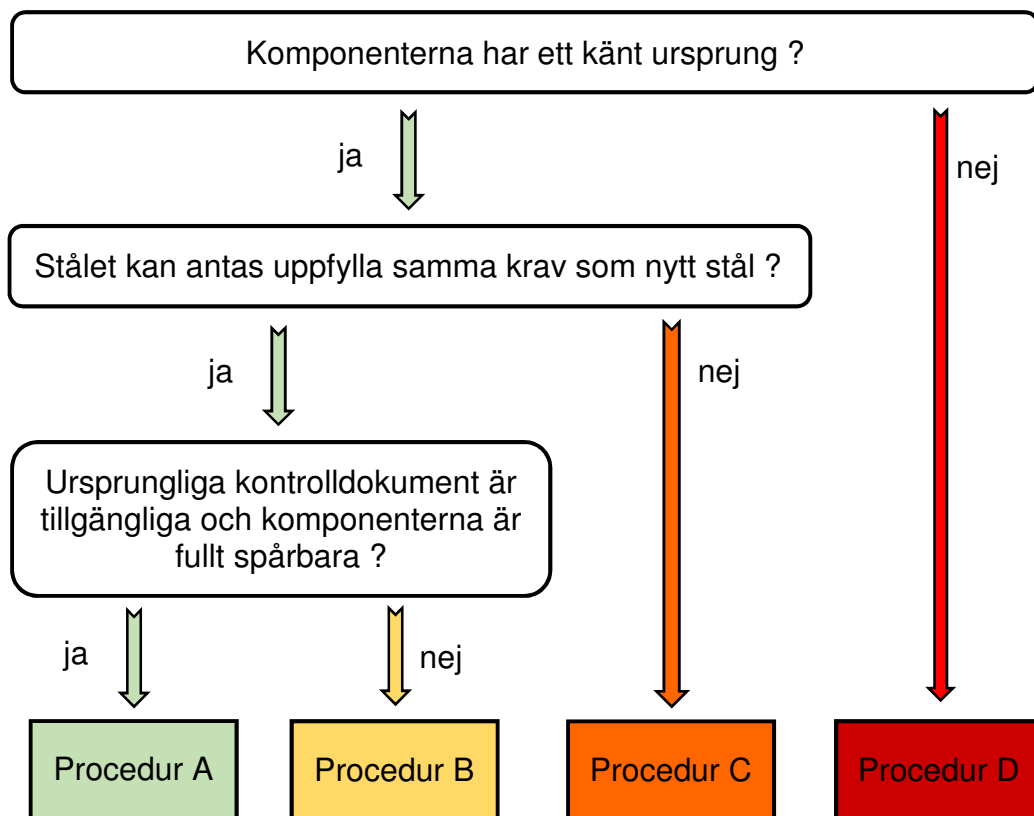
För att kunna använda återbrukade stålprofiler på samma sätt som nya krävs att deras egenskaper säkerställs på ett sätt som uppfyller regelverkets krav.

Mekaniska Verkstädernas Riksförbund tillsammans med Nordcert och ProDevelopment AB har tagit fram en handbok om återbruk av stål i bärande konstruktioner, MVR BS04:2021 [1], som ger instruktioner för sortering och klassificering av stålkomponenter.

Utgående från dessa generella instruktioner kan ett enskilt företag utveckla egna rutiner för bestämning av stålkomponenters väsentliga egenskaper som uppfyller regelverkets krav på tillförlitlighet.

Syftet med projektet var att, genom ett praktiskt exempel, visa hur sådana rutiner kan utformas.

Handboken definierar fyra olika provningsprocedurer anpassade till olika förutsättningar, dvs vad som är känt av konstruktionsdelarna och vilka egenskaper som kan förväntas, se figur 4-1.



Figur 4-1 Fyra provningsprocedurer enligt MVR BS04:2021

Vi har fokuserat på provningsprocedur B ovan som sannolikt också är det vanligaste fallet, dvs relativt nya komponenter (tillverkade efter 1971) med känt ursprung.

I Bilaga A presenteras resultat av undersökningar och praktiska erfarenheter från projektet i form av ett bakgrundsdocument till specifika rutiner.

Jämfört med innehållet i Handbok MVR BS04:2021 har följande punkter lagts till, förtydligats och anpassats till bla den specifika utrustningen:

- Kriterier för visuell inspektion;
- Praktiska rekommendationer för bearbetning av ytor inför oförstörande hårdhetsprovning;
- Acceptanskriterier för sortering i homogena kontrollgrupper;
- Urval av profiler till förstörande provning och uppskattning av säkerhetsnivån.

Noterbara avvikelser från de generella rekommendationerna i MVR BS04:2021 är att:

1. Grövre råhet tillåts än vad som generellt föreslås i DIN 50159 vid oförstörande hårdhetsprovning;
2. En mer avancerad analys med Q-Q diagram föreslås för att säkerställa en kontrollgrupps homogenitet, och;
3. Profilen med lägst hårdhet väljs som representativ för en kontrollgrupp vid förstörande provning istället för en slumpmässigt vald profil.

Bakgrundsdokumentet har granskats och godkänts av RISE genom Tom Lindström, se utlåtande i Bilaga B, och kan ses som ett exempel på bäst praxis.

Notera dock att de specifika rekommendationerna inte ska tillämpas utan vidare kontroll. Ett företags procedurer kan bygga på samma principer som i bilaga A men ska baseras på resultat som erhållits med den egna specifika utrustningen.

Procedurerna har utvecklats under projektets gång och provning av profilerna som användes i byggprojektet har inte följt de senaste rekommendationerna (tex har kontrollprofilen valts slumpmässigt). Säkerheten har dock inte påverkats negativt eftersom både stålsort och slagseghet bedömdes vara de sämst möjliga, dvs S235JR, och profilerna var överdimensionerade.

I Bilaga C visas ett exempel på utformning av ett provningsintyg som levereras tillsammans med profilerna för att styrka deras egenskaper. Efter jämförelse med kraven i komponentspecifikationen kan detta intyg bifogas till prestandadeklarationen vid CE-märkning. Med reservation för vissa avvikelser från rekommendationer i Bilaga A, se anmärkningar i förrförra stycket, innehåller Bilaga C all nödvändig information.

5 Klimatpåverkan

Huvudanledningen till att återbruka konstruktionsstål är att man därmed undviker den miljöpåverkan från återvinningsprocessen och får en produkt med överlägsen klimatprestanda.

Klimatpåverkan av en konstruktion bestäms normalt genom en livscykelanalys. Data till denna analys hämtas för ingående produkter antingen från specifika miljövarudeklarationer eller generiska databaser. Här behandlas miljövarudeklarationer (EPD) och Boverkets klimatdeklarationer baserade på en generisk klimatdatabas.

Gemensamt för dessa är att en funktionell enhet definieras för produkten. För stålprodukter ingående i bärande konstruktioner är det svårt att definiera en funktionell enhet i termer av bärförmåga och stadga. Istället används massenheter, tex ett kilogram eller ton stålprodukt, och en enkel jämförelse av EPD:er kan ge en skev bild av den slutliga resultaten då en lättare konstruktion med större påverkan per massenhet ändå kan ha en mindre totalpåverkan.

Det befintliga regelverket beaktar inte om konstruktionen är optimerad med hänsyn till vikt eller inte. Detta framgår istället av analysens slutresultat ifall alternativa lösningar övervägs. Vid användning av nytt stål där produkternas egenskaper kan väljas fritt och kostnader korreleras starkt med vikt är detta antagande rimligt eftersom det finns ett ekonomiskt incitament att använda så lite material som möjligt. Vid återbruk däremot kan korrelationen mellan pris och vikt vara mindre tydlig och det kan finnas incitament att använda tyngre profiler än nödvändigt när klimatpåverkan per massenhet är mycket låg, tex för att uppfylla kriterier i byggnadscertifieringar. Denna fråga behandlas i avsnitt 5.3.

5.1 Miljövarudeklarationer (EPD)

Normalt bestäms en byggprodukts miljöpåverkan inom ramen för nu gällande regelverk och publiceras i form av en miljövarudeklaration (EPD) enligt SS-EN 15804.

Miljöpåverkan tas fram genom en livscykelanalys där livscykeln delas in i sk moduler enligt figur 5-1 nedan.

A, Byggskede	A1-3, Produktskede	A1	Råvaruförsörjning
		A2	Transport
		A3	Tillverkning
	A4-5, Byggproduktion	A4	Transport
		A5	Byggprocess
B, Användningsskede		B1-7	Inte relevant här
C, Slutskede	C1	Demontering, rivning	
	C2	Transport	
	C3	Restproduktsbehandling	
	C4	Bortskaffning	
D, Fördelar och belastningar utanför systemgränsen		D	<i>tex ersättning av primärt material genom återvinning</i>

Figur 5-1 Indelning av livscykeln i moduler vid livscykelanalys

Eftersom återbrukat stål kan anses vara ekvivalent till nytt stål är modulerna B till D opåverkade. Även byggprocessen (modul A4 och A5) är den samma. Därför kan samma miljöpåverkan antas för

återbrukat stål som för nytt stål från och med modul A4. Däremot är produktsskedet (moduler A1 till A3) annorlunda.

Demontering och transport till ett lager hanteras uppströms i modul C1 respektive C2 för den ursprungliga produkten. Därför sätts klimatpåverkan för modul A1 till noll. Transport till tillverkning, modul A2, hanteras på samma sätt som för nytt stål. I modul A3 kan ytterligare arbetsmoment förekomma vid användning av återbrukat stål, tex avlägsning av svetsade detaljer och gammal ytbehandling. Även eventuellt spill ska hanteras i denna modul.

Påverkan från transport kan antas vara av samma storleksordning för nytt och återbrukat stål. Däremot blir en liten ökning av påverkan i modul A3 för återbrukat stål försumbar jämfört med påverkan från modul A1 för nytt stål.

Enligt Stena Ståls EPD för valsade stål profiler [2] är klimatpåverkan och total energianvändning enligt tabell 5-1.

Tabell 5-1 Klimatpåverkan och total energianvändning för nytt stål från Stena Stål

Modul	Klimatpåverkan (GWP)	Total energiåtgång (PERT+PENRT)
A1, råvaruförsörjning	0,969 kg CO ₂ -eq/kg	13,0 MJ/kg
A2, transport	0,036 kg CO ₂ -eq/kg	0,7 MJ/kg
A3, tillverkning	0,014 kg CO ₂ -eq/kg	0,0 MJ/kg
A1-A3, produktskede	1,019 kg CO₂-eq/kg	13,72 MJ/kg (=3,8 kWh/kg)

För de återbrukade profilerna som användes i projektet kan klimatpåverkan och energiåtgång uppskattas enligt tabell 5-2.

Tabell 5-2 Uppskattad klimatpåverkan och total energianvändning för återbrukat stål i projektet

Modul	Klimatpåverkan	Energiåtgång
A1, råvaruförsörjning	0 kg CO ₂ -eq/kg	0 MJ/kg
A2, transport	Transportsträckan från demonteringsplatsen till filialen och vidare till kapning är 30 km. Vi antar lastbilar Euro 5 med lastfaktor 50%.	
	0,003 kg CO ₂ -eq/kg	0,04 MJ/kg
A3, tillverkning	Påverkan från provning och kapning försummas. På säkra sidan (dvs. överskattning) antas samma värde som för nya produkter från Stena Stål. Detta täcker blästring och målning.	
	0,014 kg CO ₂ -eq/kg	0,0 MJ/kg
A1-A3, produktskede	0,017 kg CO₂-eq/kg	0,04 MJ/kg

Det återbrukade stålet i detta projekt har en klimatpåverkan mindre än 2% av den för motsvarande nytt stål. Förhållandena är ännu gynnsammare för energiåtgången.

Förutsättningarna i detta specifika projekt var särskilt gynnsamma då profilerna hittades mycket nära lagerplatsen. Dessutom är det troligt att återbrukade profiler skulle rekonditioneras, dvs blästras och eventuellt målas och kapas till önskad längd, före leverans till kund. En mer realistisk uppskattning av klimatpåverkan vid kommersiellt återbruk beskrivs i tabell 5-3.

Tabell 5-3 Uppskattad klimatpåverkan och total energianvändning för återbrukat stål

Modul	Klimatpåverkan	Energiåtgång
A1, råvaruförsörjning	0 kg CO ₂ -eq/kg	0 MJ/kg
A2, transport	En generisk transportsträcka från demonteringsplats till lager och denna tas som 250 km (dvs ca halva sträcka mellan Stockholm och Göteborg) Vi antar lastbilar Euro 5 med lastfaktor 50%.	
	0,02 kg CO ₂ -eq/kg	0,31 MJ/kg
A3, tillverkning	Påverkan från provning försummas. Vi antar att profilerna blåstras och målas som nya.	
	0,014 kg CO ₂ -eq/kg	0,0 MJ/kg
A1-A3, produktskede	0,034 kg CO₂-eq/kg	0,31 MJ/kg

Det är transporten från demonteringsplatsen till ett lager eller rekonditioneringsplats som kan bli den största klimatpåverkan hos återbrukat stål. Den totala påverkan är dock mycket liten, några få procent av den hos nytt återvunnet stål. Miljöfördelarna består även vid långa transportsträckor.

5.2 Klimatdeklarationer

Från den 1 januari 2022 ska nya byggnader klimatdeklareras och Boverket tillhandahåller en databas med generiska klimatdata.

Enligt denna databas (version 01.02.000, 2021-06-18) får klimatpåverkan från återanvända byggprodukter sättas till noll för moduler A1 till A3. Påverkan från transport antas bero på en sträcka på 40 km med lastbil (0,0045 kg CO₂e/kg).

I tabell 5-4 jämförs klimatpåverkan för malmbaserat, skrotbaserat och återbrukat stål. Det är tydligt att återbrukat stål har överlägsna egenskaper med nära noll påverkan.

Tabell 5-4 Generiska klimatdata för stålprodukter enligt Boverkets klimatdatabas (version 01.02.000, 2021-06-18)

Modul	Malmbaserat stål (konstruktionsrör)	Skrotbaserat stål (H- och I-profiler)	Återbrukat stål
A1-A3, produktskede	3,1500 kg CO ₂ -eq/kg	1,1250 kg CO ₂ -eq/kg	0,0000 kg CO ₂ -eq/kg
A4, transport	0,0795 kg CO ₂ -eq/kg		0,0045 kg CO ₂ -eq/kg
A1-A4	3,2295 kg CO ₂ -eq/kg	1,2045 kg CO ₂ -eq/kg	0,0045 kg CO ₂ -eq/kg

5.3 Klimatpåverkan och överdimensionering

Om en ny profil ersätts av en likvärdig återbrukat profil med exakt samma kvalitet och tvärsnitt är miljönyttan mycket stor.

Däremot, om större profiler och/eller profiler med sämre kvalitet används krävs mer material för att uppfylla samma funktion (bärighet och/eller styvhet) och trots mindre påverkan per massenhet kan den totala påverkan ändå bli större. Det finns därför en gräns för rimlig överdimensionering vid återbruk.

Enligt miljövarudeklarationerna i avsnitt 5.1 blir den totala klimatpåverkan från återbrukat stål i produktskede (A1-3) ca 1/30 av den från nytt stål. Det vore därför teoretiskt möjligt att använda trettio

gånger mer återbrukat stål än nödvändigt utan att påverka den totala klimatpåverkan – om vi bortser från transporter, montering och återvinning i senare skede.

Ur ett globalt perspektiv ökar efterfrågan på stål. Om man binder i en byggnad mer återbrukat material än vad som verkligen krävs leder detta till en minskad tillgång på skrot och ett ökat behov av primärt material.

Detta fenomen hanteras inte av regelverket och är något som entreprenörer och konstruktörer själva bör ta ställning till.

I detta projekt gick konstruktionens vikt upp från 378 till 958 kg medan den faktiska klimatpåverkan sjönk från 385 till 16 kg CO₂-eq, en stor minskning på 369 kg CO₂-eq (-96%).

Å andra sidan hade också det återbrukade stålet kunnat återvinnas vilket kan ses som att en mängd malmbaserat material motsvarande viktskillnaden på 580 kg kunde ersättas av skrotbaserat material med bättre miljöprestanda. Som en grov uppskattning kan vi anta att klimatpåverkan från malmbaserat stål är tre gånger större än från skrotbaserat stål. Överskottet av återvunnet stål ger då upphov till ytterligare utsläpp från återvinningsprocessen, ca 591 kg CO₂-eq, medan alternativet från malm är sämre med ca 1 773 kg CO₂-eq. Skillnaden är en potentiell minskning på 1 182 kg CO₂-eq som dras av från klimatpåverkan från lösningen baserade på nytt stål. Slutligen fås en bättre total balans på minus 797 kg CO₂-eq.

Det absolut bästa alternativet hade varit att återbruka profilerna men i en konstruktion där de kunde utnyttjas full ut. I detta fall kunde man räkna med en faktisk minskning på 976 kg CO₂-eq.

Nedan ges rekommendationer baserade på exempel i prEN 17662 som tar hänsyn till fördelar och belastningar utanför systemgränser (modul D), dvs. det som händer mellan livscyklerna.

Vi kan jämföra två scenarier:

1. Konstruktionen projekteras på nytt för att använda tillgängliga återbrukade profiler, och;
2. Konstruktionen utförs med nya profiler enligt ursprunglig dimensionering samtidigt som de återbrukade profilerna återvinns.

Scenario 1, återbruk:

De återbrukade profilerna har en total vikt m_A och deras relativa klimatpåverkan blir:

$$e_{1,A_b} = m_A E_{A_b}$$

där,

$$E_{A_b} = \text{klimatpåverkansfaktor från demonteringsprocessen till återanvändbar profil [kg CO₂-eq/kg]}$$

Scenario 2, nytt stål och återvinning:

Profilerna i scenario 1 återvinns och nya profiler med vikt m_N används i konstruktionen. Normalt kan man anta att I- och H-profiler är av sekundärt material (skrotbaserat) och konstruktionsrör är av primärt material (malmbaserat). För enkelhetss skull kan man anta på säkra sidan att samtliga nya produkter är av sekundärt material.

Materialåtgången i konstruktionen är mindre ($m_N < m_A$) och en mängd stål $m_X = m_A - m_N$ kan därför användas till något annat, dvs utanför systemgränser, och ersätta primärt material i ett globalt perspektiv.

Klimatpåverkan blir:

$$e_{2,\text{ÅV}} = m_{\text{Å}}E_{\text{ÅV}} + m_{\text{N}}E_{\text{profil}} + m_{\text{X}}E_{\text{skrot}} - m_{\text{X}}E_{\text{malm}}$$

där,

$E_{\text{ÅV}}$ = klimatpåverkansfaktor från rivningsprocessen till sorterad skrot

E_{profil} = klimatpåverkansfaktor vid tillverkning av en ny profil från sekundärt material

E_{skrot} = klimatpåverkansfaktor vid tillverkning av sekundärt stål från 100% skrot (ljusbågsugn)

E_{malm} = klimatpåverkansfaktor vid tillverkning av primärt stål från 100% malm (masugn)

Återbruk, dvs scenario 1, har mindre klimatpåverkan om:

$$m_{\text{Å}}(E_{\text{ÅV}} - E_{\text{Åb}}) + m_{\text{N}}E_{\text{profil}} + m_{\text{X}}E_{\text{skrot}} - m_{\text{X}}E_{\text{malm}} \geq 0$$

Enligt Bilaga I i prEN 17662 är klimatpåverkan från demontering något större än från rivning men skillnaden är liten i förhållande till klimatpåverkan vid tillverkning så för enkelhetens skull kan den försummas.

Efter omformulering fås:

$$\frac{m_{\text{Å}}}{m_{\text{N}}} \leq 1 + \frac{E_{\text{profil}}}{E_{\text{malm}} - E_{\text{skrot}}}$$

E_{malm} är klimatpåverkansfaktorn vid tillverkning av stål från 100% malm. Det är ett teoretiskt värde eftersom en viss mängd stålskrot alltid ingår vid tillverkning av primärt stål i masugn. Beräkning av denna faktor beskrivs av World Steel Association [3]. I princip interpoleras värden från tillverkning med olika stora andelar skrot i processen. Med data från 2010 får Broadbent [4] följande värden:

$$E_{\text{malm}} = 1,92 \text{ kg CO}_2\text{eq/kg}$$

$$E_{\text{skrot}} = 0,39 \text{ kg CO}_2\text{eq/kg}$$

Klimatpåverkansfaktorn för tillverkning av en ny profil kan tas ur Stena Ståls klimatvarudeklaration [2] för moduler A1-A3, dvs $E_{\text{profil}} = 1,02 \text{ kg CO}_2\text{eq/kg}$.

Slutligen får man:

$$\frac{m_{\text{Å}}}{m_{\text{N}}} \leq 1,7$$

Detta är ett riktvärde som betyder att återbrukade produkter medför en miljönytta så länge övervikten hålls under 70% av den optimala lösningen med nya profiler. Notera att det exakta värdet är projektspecifikt och kan behöva justeras över tid.

En enkel tumregel på säker sida kan vara att begränsa "överdimensioneringen" till 50 % i vikt, och ju mindre övervikt desto bättre.

6 Ekonomi

6.1 Inkomster

Efter kvalitetssäkring enligt kapitel 4 blir återbrukat stål likvärdigt nytt stål och kan därmed säljas till samma pris.

Stålspriser har varierat mycket på sistone. I skrivande stund är listpriset för VKR och KKR ca 40 respektive 39 kr/kg. H-balk är lite billigare med ca 32 kr/kg. Med rabattavtal uppskattas kilopriset för en obearbetad profil till **ca 15-16 kr/kg**.

Tack vare sina goda miljöegenskaper kan återbrukat stål möjligen säljas för ett högre pris än nytt stål och/eller utgöra en konkurrensfördel. Detta kan hanteras på olika sätt:

1. Återbrukat och nytt stål blandas efter tillgång vilket ger en generell konkurrensfördel tack vare lägre genomsnittliga utsläpp.
2. Återbrukat stål hanteras som en egen produkt med bättre miljöegenskaper.

Arbetsgruppen anser att återbrukat stål helst bör hanteras som en egen produkt. Uppfattningen är att byggprojekt kan delas in i projekt med och utan miljöprofil där återbrukat stål är av intresse endast i det senare fallet.

Vid projekt med tydlig miljöprofil finns ett starkt incitament att maximera fördelar med återbrukat stål, dvs nära noll utsläpp, se kapitel 5, och framförallt möjlighet att få poäng i olika certifieringssystem för byggnader.

Argument emot en blandning av nytt och återbrukat stål är att regelverket för miljövarudeklarationer inte tillåter produkter i samma deklARATION för vilka egenskaper skiljer sig mer än 10%. Dessutom försvåras redovisning av varierande och osäkert tillgång på återbrukat stål.

Låga utsläppsvärden kan i vissa fall ha ett kommersiellt värde om t.ex. krav på klimatkompensationer ställs i ett projekt eller en byggnads miljöprestanda beaktas vid en värdering.

MVR erbjuder t.ex. klimatkompensation (Grönt Stål) genom trädplanteringsprojekt i Bolivia (Plan Vivo) för mellan 0,45 och 0,65 kr/kg beroende av stålsort, och CORC (*CO₂ Removal Certificate*) kan köpas för mellan 25 och 500€ per ton koldioxid beroende på typ av projekt och teknologi (biokol, CCS, mm).

6.2 Kostnader

6.2.1 Inköpspris

Inköpspriset för återbrukade komponenter är en kombination av skrotvärde och extra kostnad pga en – relativt till rivning – mer krävande demontering.

Skrotpriser har ökat mycket den senaste tiden och nått i skrivande stund **ca 4,5 kr/kg**.

Vad gäller demonteringskostnader presenterar Vares [5] en jämförelse mellan kostnader för rivning och demontering av en liten stålhall i Finland. Konstruktionen består av sex tvåledsramar med spännvidd 16 m och delning 6 m samt reglar, takåsar och stagning. Pelare och balkar består av svetsade profiler med varierande tvärsnitt. Konstruktionens totala vikt är 13,7 t.

Tabell 6-1 Kostnaderna för rivning och demontering av en stålhall i Finland, enligt [5]

Aktivitet	Totalkostnad [€]	Approximativ kostnad per ton [kr/t]
Montering	7 878	6 000
Rivning	4 569	3 500
Demontering	6 144	4 700
Provning/rekonditionering	4 727	3 600
Audit + rivning	7 569	5 800
Audit + demontering	12 144	9 300

Kostnaderna för rivning utgör ca 60 % av kostnaderna för montering. Demontering medför en merkostnad med ca en tredjedel jämfört med rivning. Dessutom bedöms inspektionen av byggnaden vara dubbelt så kostsam inför demontering.

Inkluderas dessa kostnader blir merkostnaden för demontering jämfört med rivning ca 60 % och ca 3 500 kr/t.

Yeung presenterar i [6] en jämförelse mellan kostnader för rivning och demontering av en större stålkonstruktion till en envånings byggnad på 61,5 x 94,3 m i Kanada. Konstruktionens totala vikt är 114 t.

Tabell 6-2 Kostnaderna för rivning och demontering av en stålkonstruktion i Kanada, enligt [6]

Aktivitet	Totalkostnad [\$]	Approximativ kostnad per ton [kr/t]
Rivning	387 000	32 200
Återbruk	564 000	47 000
Friställning	433 500	36 000
Demontering	40 500	3 400
Transport	2 000	170
Rekonditionering	88 000	7 300

Om transport och rekonditionering behandlas separat är kostnaderna för återbruk ca 39 400 kr/t vilket är en merkostnad på ca 22 % jämfört med rivning. De totala kostnaderna skiljer sig avsevärt från dem enligt Vares. Detta tyder på att Yeung har räknat med kostnaderna för rivning av hela byggnaden inklusive installationer och eventuell sanering medan Vares har fokuserat på stålkonstruktionen enbart. I absoluta tal blir merkostnaderna för demontering enligt Yeung ca 3 900 kr/t vilket är nära uppskattningen från Vares.

Dunant har undersökt kostnader för återbruksprojekt i Storbritannien [7] och kommer fram till mindre siffror, mellan 1,4 och 1,9 kr/kg.

Det framgår från dessa studier att variationen är stor. En grov uppskattning är att merkostnaden för demontering är **mellan 2 och 4 kr/kg**.

6.2.2 Provning

Kostnaderna för provning består av en fast kostnad per kontrollparti för förstörande provning och upprättande av ett provningsintyg samt en kostnad per profil för oförstörande provning. Den slutliga kostnaden per kilogram stål är därför beroende av profiltypen och storleken på kontrollpartiet, där stora grupper av tunga profiler (kombination av tvärsnitt och längd) är mer lönsamma.

Kontroll av profilerna genom oförstörande provning, dvs visuell kontroll, mätning av tvärsnittsdimensioner och hårdhetsprovning inklusive slipning gick mycket snabbare än vad som tidigare uppskattats [8]. Vi kan utgå från ca 5 minuter per profil och med en timkostnad på 900 kr blir kostnaden **75 kr/balk**.

Förstörande provning bestående av dragprovning, slagseghetsprovning och undersökning av den kemiska sammansättningen utförs av ett ackrediterat labb. Eventuellt kan detta ske internt men mest troligt är att ett externt företag anlitas. Kostnader för provning i Sverige är internationellt sett mycket höga och variationen är stor: från 5 500 kr per prov om flera prov lämnas in samtidigt till flera 10 000 kr för en enda prov. Dessa kostnader inkluderar tillverkning av standardiserade provstycke utifrån en bit profil samt fullständig provningsrapport.

Det är rimligt att anta en kostnad på **7 500 kr per prov i Sverige**. Alternativt kan provstycken skickas utomlands, i t ex Storbritannien eller Baltikum där kostnaderna per prov kan variera mellan 2 000 och 5 000 kr.

Därtill behöver även ett provningsintyg utföras. Om en mall är tillgänglig kan en van handläggare utföra ett provningsintyg på ca en timme. Med samma timkostnad som ovan tillkommer därmed en kostnad på ca 900 kr.

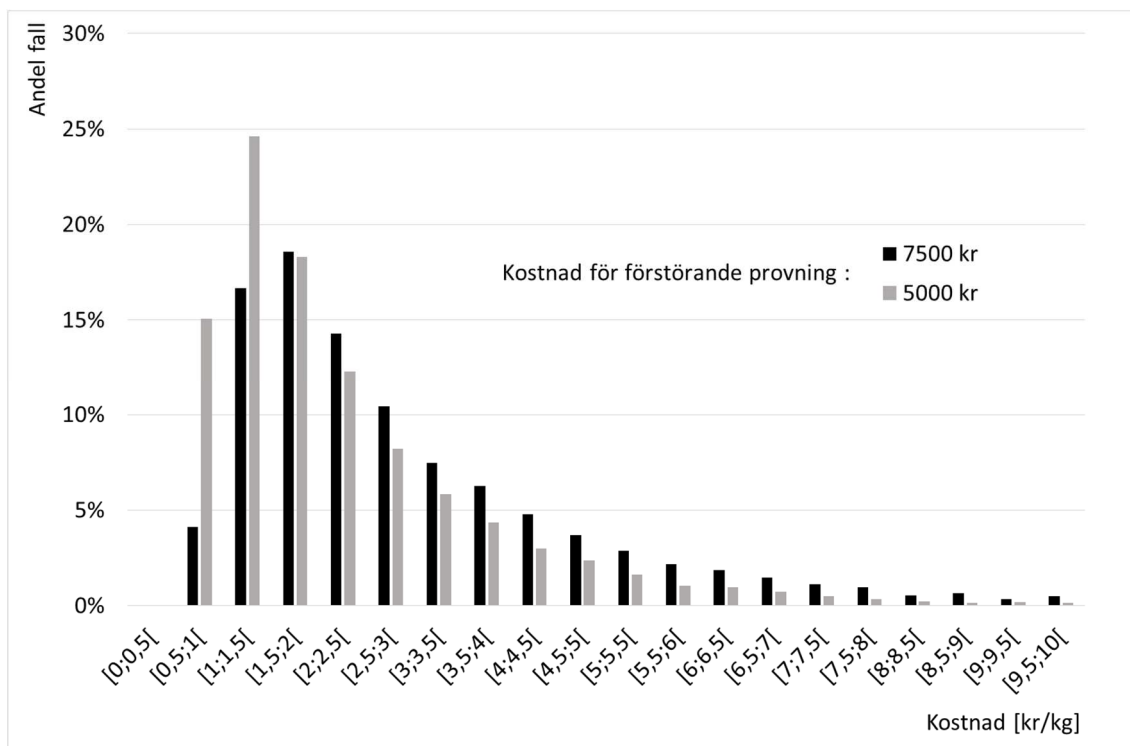
Vanliga profiler (HEA 160 till 300, KKR 100x5 till 300x10) har en vikt mellan ca 15 och 90 kg/m och vi kan anta en längd mellan 3 och 6 m.

I [7] uppskattas att en genomsnittlig stålprofil i hus i Storbritannien väger 340 kg vilket är mer än den genomsnittliga profilen enligt ovan.

Om vi antar att kontrollpartier innehåller mellan 10 och 30 profiler blir den genomsnittliga kostnaden 2,1 eller 1,6 kr/kg om den fasta kostnaden för förstörande provning är 7 500 respektive 5 000 kr.

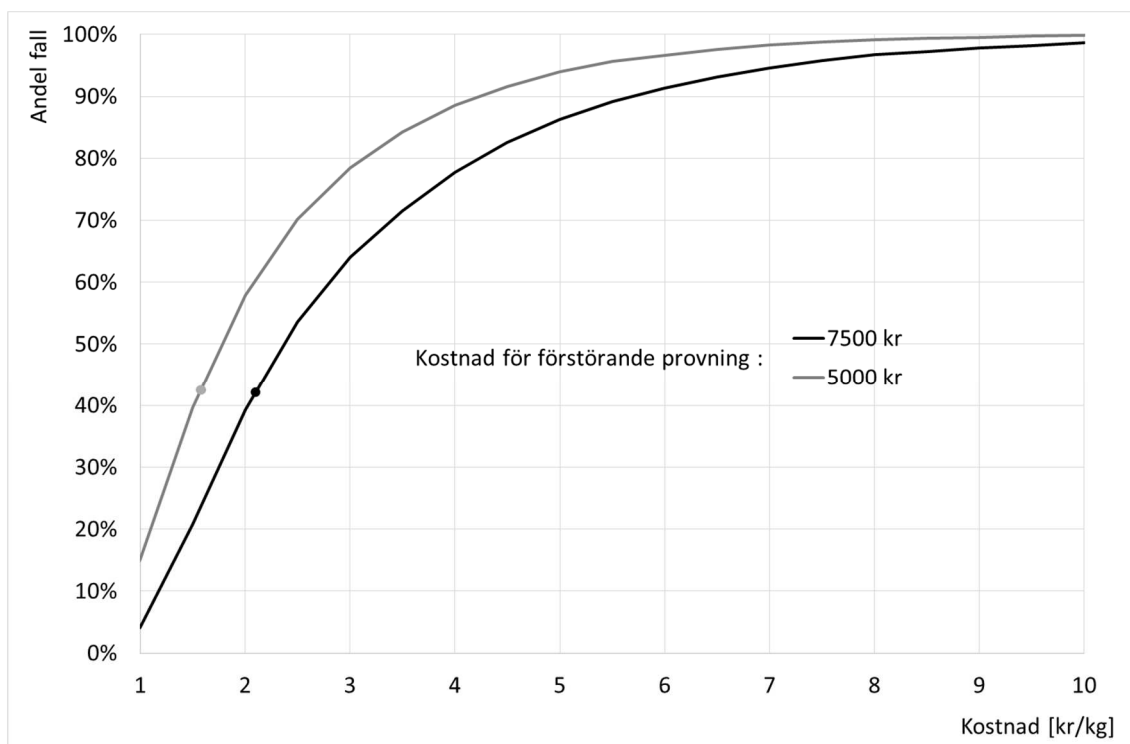
Detta är konsekvent med siffror i [7] där kostnader för provning uppskattas till mellan 1,7 och 2,0 kr/kg.

Om förutsättningarna varierar slumpmässigt inom ramarna ovan fördelas kostnaden enligt



Figur 6-1 Statistisk fördelning av kostnaderna

Från den kumulativa funktionen nedan framgår att kostnaden för provning hamnar under 3 kr/kg i ca 70% av fallen.



Figur 6-2 Statistisk kumulativ funktion av kostnaderna

Genom en rivningsaudit kan de oekonomiska fallen sorteras bort i ett tidigt skede. Därför är det rimligt att utgå ifrån kostnader för provning i storleksordning **2 till 3 kr/kg**.

6.2.3 Transport

Transportkostnader varierar med bl.a körsträcka och mängd.

I detta projekt har ca 1 ton fraktats mellan Stenkullen och Huddinge (456 km) av ett logistikföretag för 1380 kr vilket ger ett riktvärde på 3 kr/t/km.

Vid chartring av särskild lastbil för kortare sträckor (10-12t, 80 km) blir kostnaderna ca 5 kr/t/km.

Om vi utgår ifrån en genomsnittlig transportsträcka på 250 km (ca halva sträcka mellan storstadsregionerna Stockholm och Göteborg) blir transportkostnaderna i storleksordning **1 kr/kg**.

6.2.4 Rekonditionering

Rekonditionering är den verkstadsprocess som leder till en återbrukad produkt med samma egenskaper som en motsvarande ny produkt.

För valsade profiler kan rekonditionering innebära tex avlägsning av svetsade detaljer och blästring.

Brandskydd som behöver avlägsnas mekaniskt eller kemiskt samt rostskydd innehållande förbjudna giftiga ämnen lär medföra relativt stora kostnader som inte behandlas här.

Sågning är relativt billigt. Dunant [7] uppskattar kostnaderna till mellan 1,0 och 1,4 kr/kg.

Det påpekades i projektet att återbrukade profiler bör blästras före leverans till kund för att de ska kunna hanteras på samma sätt som nya, se kapitel 3. Dunant [7] uppskattar kostnaderna för blästring till mellan 0,2 och 0,6 kr/kg.

6.2.5 Lagring

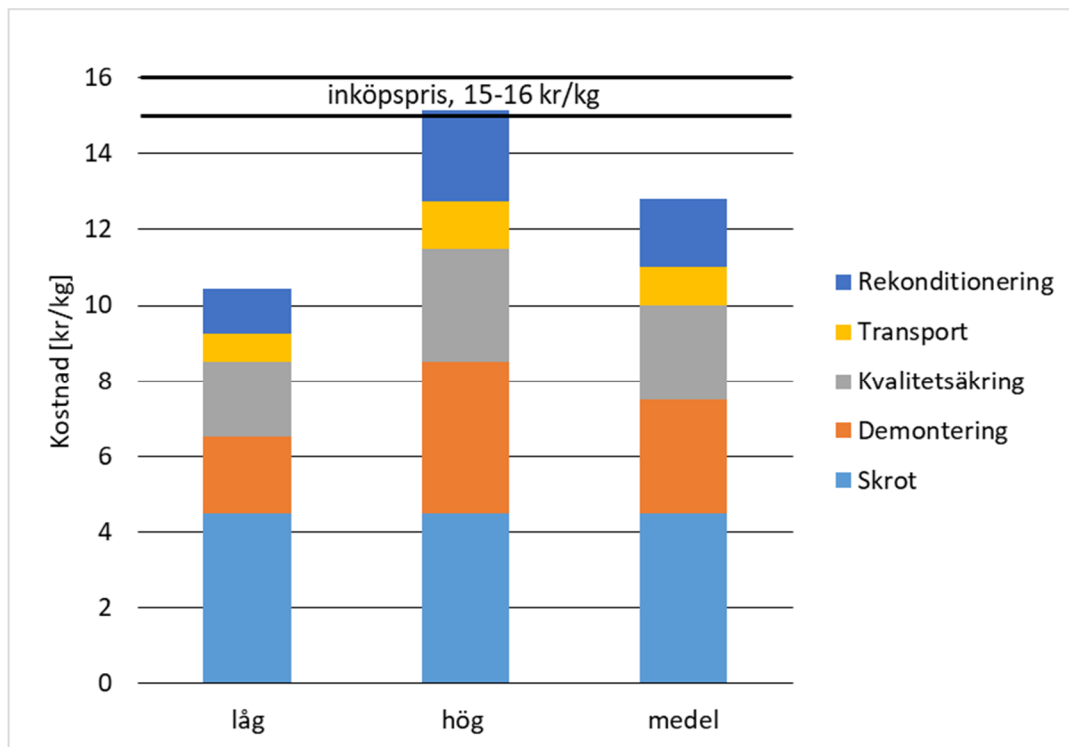
Antagligen kräver återbruk i kommersiellt syfte lagerhållning. Förutom kostnader för själva lagring i form av mark, byggnad och hantering påverkas även resultaten av externa faktorer som inflation och prisutveckling.

Behov av lagring kan minimeras genom att fokusera på återbruk av vanliga produkter vars säljbarhet är hög. Dessa fall kan upptäckas genom en enkel rivningsaudit som kan hjälpa till att hålla kostnaderna för lagring låga [8]. Vi noterar också att markkostnaderna i Sverige är låga jämfört med tex Storbritannien. Därför har vi försummat lagringskostnader i fortsättning.

Å andra sidan förr Dunant [7] ett resonemang där specialiserade leverantörer kan utnyttja prisskillnader mellan skrot och nytt stål för att maximera sin profit genom att samla återbrukbara profiler när skrotpriser är låga.

6.3 Sammanfattning

I diagrammet nedan, figur 6-3, sammanfattas kostnadsuppskattningarna vid återbruk. Störst andel består av skrotpriset. Andra största posten är demonteringskostnaderna som också bidrar med den största osäkerheten. Kvalitetssäkring enligt kapitel 4, uppgår till ca 20 %, dvs i samma storleksordning som demonteringskostnaderna. Rekonditionering och framförallt transport är av mindre betydelse.



Figur 6-3 Sammanfattning av kostnadsuppskattningar vid återbruk

Den totala kostnaden hamnar under eller strax över inköspriset för nytt konventionellt stål vilket tyder på att återbruk av valsade komponenter kan vara kommersiellt gångbart i synnerhet om de goda miljöegenskaperna kan rättfärdiga högre priser.

7 Slutsatser

Arbetsgruppens bedömning är att ett företag specialiserad i hantering av återbrukade profiler har störst chans att slå igenom på marknaden. Produkterna bör vara likvärdiga nya, dvs kvalitetssäkrade och rekonditionerade (kapade och blåstrade).

Rekommendationerna i MVR BS04:2021 utgör en praktiskt tillämpbar lösning för sortering och klassificering av profiler med följande ändringar och tillägg:

- Rekommendationer för bearbetning av ytor inför oförstörande provning kan avvika från DIN 50159 om detta har stöd i specifika testresultat;
- Mer avancerad analys t.ex. med Q-Q diagram rekommenderas för att säkerställa en kontrollgrupps homogenitet, och;
- Profilen med lägst hårdhet bör väljas som representativ för en kontrollgrupp vid förstörande provning.

Genom att säkerställa de väsentliga egenskaperna enligt SS-EN 1090-2 kan återbrukade profiler vara ingående produkter till en CE-märkt konstruktion. I så fall styrks egenskaperna av ett provningsintyg vars egenskaper jämförs med de som föreskrivs i komponentspecifikationen. Provningsintyget bifogas till prestandadeklarationen istället för tillverkarens inspektionsdokument.

Bilagor A och C är exempel på god praxis och kan enkelt användas som underlag för utveckling av egna rutiner. De ska däremot inte användas som de är utan hänsyn till de egna förutsättningarna, framförallt gällande utrustning.

Generellt sett är återbrukat stål överlägset med nära noll utsläpp per massenhet. Om nya profiler ersätts av återbrukade blir det konstruktörens bedömning som kan avgöra miljönyttan i ett större perspektiv. Vi rekommenderar att inte ersätta nya profiler med återbrukade om vikten ökar med mer än 50%.

Vid Kvalitetssäkring av profiler med procedur B enligt MVR BS04:2021 är provningskostnader i storleksordning 2 till 3 kr/kg och uppskattningsvis ca 20 % av totalkostnaden som hamnar strax under priset för nytt stål. Återbruk av stålkomponenter är kommersiellt möjligt.

Den största kostnaden och osäkerhet kan härledas till demontering. För att öka lönsamheten är det därför viktigt att få så mycket ut av värde ur ett rivningsobjekt för att sprida kostnader på fler återbrukade produkter.

Efterfrågan på återbrukade stål profiler finns och accepterade metoder för kvalitetssäkring är tillgängliga. Fortsatt arbete om återbruk bör därför nu fokusera på att identifiera lönsamma rivningsobjekt och öka tillgången.

8 Referenser

- [1] Mekaniska Verkstädernas Riksförbund, Handbok MVR BS04:2021 - Återbruk av stål i bärande konstruktioner, 2021.
- [2] Stena Stål AB, "Environmental Product Declaration for Steel Beams," S-P-02626, EPD International AB, 2021-02-29.
- [3] World Steel Association, "Life cycle inventory methodology report for steel products," Bryssels, 2017.
- [4] C. Broadbent, "Steel's recyclability: demonstrating the benefits of recycling steel to achieve a circular economy," *International Journal of Life Cycle Assessment*, pp. 1658-1665, 21 november 2016.
- [5] S. Vares, P. Hradil, M. Sansom och V. Ungureanu, "Economic potential and environmental impacts of reused steel structures," *Structure and Infrastructure Engineering*, vol. 16:4, 2020.
- [6] J. Yeung, *Development of Analysis Tools for the Facilitation of Increased Structural Steel Reuse*, 2016.
- [7] C. F. Dunant, M. P. Drewniok, M. Samson, S. Corbey, J. M. Cullen och J. M. Allwood, "Options to make steel reuse profitable: An analysis of cost and risk distribution across the UK construction value chain," *Journal of Cleaner Production*, vol. 183, 2018.
- [8] W. Husson och O. Lagerqvist, "Prospekteringsmetodik för återanvändning av stålkonstruktioner," 2020-05-29.
- [9] S. S. Shapiro och M. B. Wilk, "An analysis of variance test for normality (complete samples)," *Biometrika*, vol. 52, 1965.
- [10] J.-M. Schneider, M. Bigerelle och A. Iost, "Statistical analysis of the Vickers hardness," *Materials Science and Engineering*, vol. A262, 1999.
- [11] C. F. Dunant, M. P. Drewniok, M. Sansom, S. Corbey, J. M. Allwood och J. M. Cullen, "Real and perceived barriers to steel reuse across the UK construction value chain," *Resources, Conservation & Recycling*, vol. 126, 2017.

Bilaga A

-

Bakgrundsdocument till procedur för bedömning av
egenskaper hos återbrukat konstruktionsstål enligt
MVR BS04:2021

Bakgrundsdocument till procedur för bedömning av
egenskaper hos återbrukat konstruktionsstål enligt
MVR BS04:2021

2021-12-14

Wylliam Husson

Innehållsförteckning

1	Inledning.....	2
2	Lämplighet för återbruk	3
3	Förhållande mellan hårdhet och brottgräns	4
4	Acceptanskriterier för sortering i homogena provningspartier	5
4.1	Inledning.....	5
4.2	Undersökningar	5
4.3	Diskussion.....	11
4.4	Rekommendationer.....	17
5	Kontroll av dimensioner och toleranser.....	18
6	Oförstörande provningar.....	19
6.1	Oförstörande hårdhetsprovning	19
6.1.1	Bearbetning av ytan inför hårdhetsprovning	19
6.1.2	Hårdhetsprovning.....	25
6.2	Oförstörande analys av kemisk sammansättning	26
7	Förstörande provningar.....	27
7.1	Inledning.....	27
7.2	Dragprovning.....	27
7.3	Slagseghetsprovning.....	29
7.4	Kemisk sammansättning.....	29
8	Referenser	30

1 Inledning

Detta dokument utgör grunden till en företagsspecifik procedur för bedömning av återbrukat stål enligt MVR BS04:2021.

Fokus ligger på procedur B, dvs proceduren som gäller för stålprodukter med känt ursprung tillverkade efter 1971. I detta fall kontrolleras samtliga profiler i ett kontrollparti med oförstörande provning (hårdhetsmätning) och om partiet bedöms vara homogent gäller resultaten från förstörande provningar på en enda profil för hela partiet.

Notera att belastningshistoriken inte undersöks. Bärförmågan vid utmattande belastning kan därmed inte säkerställas och återbrukade profiler får endast användas i statistiskt eller kvasistatiskt belastade bärande konstruktioner upp till och med utförandeklass EXC2. Detta ska framgå tydligt vid leverans av återbrukade profiler.

I kapitel 2 beskrivs de urvalskriterier som gäller vid initial kontroll av lämpliga profiler.

I kapitel 3 diskuteras hur hårdhetsmätningar kan användas för att bedöma hållfasthetsegenskaper och sortera profiler i homogena kontrollpartier.

I kapitel 4 undersöks olika acceptanskriterier för sortering i homogena grupper. Det rekommenderas att profilen med den minsta genomsnittliga hårdheten anses som representativ för kontrollpartiet och används till förstörande provningar. Detta är ett avsteg från rekommendationerna i MVR BS04:2021.

Det är i praktiken omöjligt att uppnå helt felfria bedömningar och en acceptabel sannolikhet för fel måste tillåtas. Genom försök med den specifika mätutrustningen kunde en statistisk fördelning hos hårdhetsmätningar antas och användas för att beräkna en sannolikhet för felbedömningar.

I kapitel 5 beskrivs kontroll av dimensioner och toleranser.

I kapitel 6 avhandlas oförstörande provning i form av hårdhetsprovning och analys av kemisk sammansättning. Rekommendationer presenteras för hur ytorna bör prepareras inför hårdhetsmätningar. Dessa rekommendationer är baserade på försök gjorda med en specifik utrustning och bör inte extrapoleras utan vidare beaktande.

I kapitel 7 diskuteras slutligen tolkningen av förstörande provningar och vilka acceptanskriterier som kan tillämpas för att bestämma om ett återbrukat stål kan anses ekvivalent till en viss stålsort.

2 Lämplighet för återbruk

Procedur B i MVR BS04:2020 är enbart tillämplbar för varmvalsade och kallformade profiler i konstruktionsstål med känt ursprung och tillverkade efter 1971.

Det är därför nödvändigt att ha tillförlitlig information, i form av konstruktionshandlingar och/eller bilder, om materialets ursprung samt att kunna styrka tillverkningsåret.

Demonterade komponenter ska vara spårbara i alla stadier från demontering till återbruk. Varje profil ges en särskild beteckning som kan härledas till dess placering och funktion i den ursprungliga konstruktionen.

Profilerna markeras i båda ändar med märkpenna.

Samtliga profiler inspekteras initialt genom visuell kontroll.

Profiler sorteras bort om de visar tecken på:

- deformationer som tyder på plasticering;
- försvagning av tvärsnitt (hål, urtag, sprickor);
- korrosion, eller;
- brandpåverkan.

Ytlig korrosion tillåts om profilerna blästras och de därefter uppmätta tvärsnittsdimensionerna uppfyller toleranskraven för den förutsatta profiltypen.

Forskning visar att varmformat konstruktionsstål behåller sina ursprungliga egenskaper om det inte utsätts för temperaturer över 500 till 600°C, se [1] och [2]. Kallformat stål och värmebehandlat stål är känsligare men kan antas behålla sina egenskaper om de inte utsätts för temperaturer över 300°C. För att bedöma egenskaperna hos brandpåverkat stål hänvisar *American Institute of Steel Construction* [3] till procedurer där raka profiler – som inte undergått stora deformationer – anses kunna återbrukas [4].

Med bedömning på säker sida antas profiler vara brandpåverkade om deras ytbeläggning visar spår på exponering av höga temperaturer, tex blåsor, missfärgning, flagning, mm.

Lokala skador kan tillåtas. I så fall ska de markeras och avlägsnas i ett senare skedde.

Profiler med uppenbart lika egenskaper delas in i kontrollpartier och detta dokumenteras.

De egenskaper som beaktas vid indelningen i kontrollpartier är:

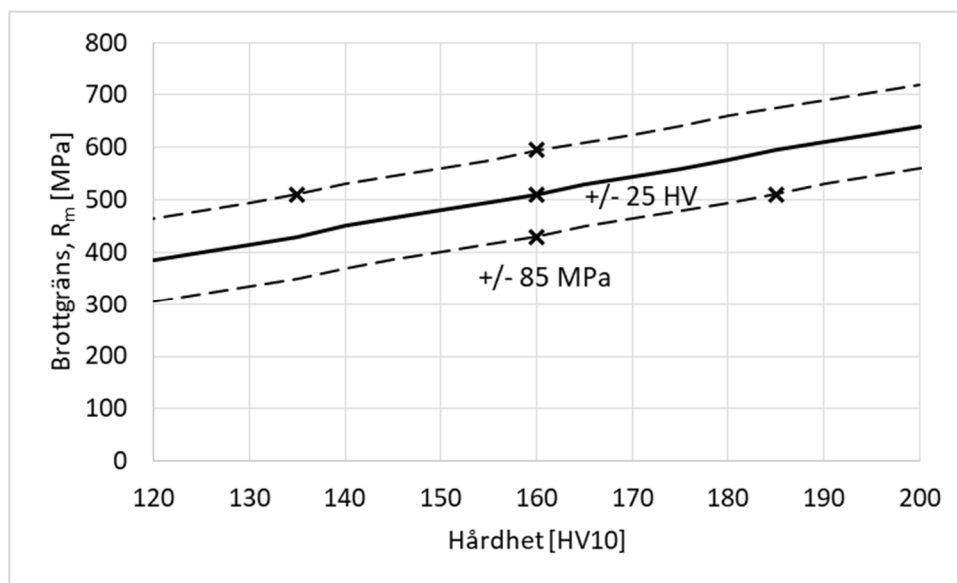
- ursprung
- ursprunglig funktion (t ex pelare eller takbalk)
- profiltyp och tvärsnittsdimensioner (t ex HEA 200 eller VKR 150x150X6), samt;
- ytbeläggning.

3 Förhållande mellan hårdhet och brottgräns

Det finns en positiv korrelation mellan hårdhet och brottgräns där ett större hårdhetsvärde indikerar en större brottgräns. Baserat på empiriska samband kan brottgränsen härledas från hårdhetsmätningar i specifika applikationer där andra påverkande parametrar (E-modul, R_{eH}/R_m , mikrostruktur, mm) är kända.

Konverteringstabeller för vanliga stålsorter anges i bilaga A i SS-EN ISO 18265:2013. Enligt denna standard är konverteringen mellan hårdhet och brottgräns den minst pålitliga av alla och bör därmed endast användas i informativt syfte.

Värdena i SS-EN ISO 18265:2013 har tagits fram av VDEh (Tyska järn och stål institutet) och baseras på ca 700 försök. Resultatens spridning var ca +/- 25 HV10 och +/- 85 MPa vilket illustreras i figur 3-1 nedan.



Figur 3-1 Principiell spridning vid konvertering mellan hårdhet och brottgräns enligt SS-EN ISO 18265.

Hårdhetsmätningar bedöms vara lämpliga för att bekräfta homogeniteten hos en grupp profiler. Om profilerna är lika hårda (med en viss variation pga mätmetoden) kommer de också ha samma brottgräns och i förlängning även övriga hållfasthetsegenskaper.

Däremot är metoden olämplig för att, på ett tillförlitligt och reproducerbart sätt, bestämma den genomsnittliga brottgränsen hos olika grupper. Hållfasthetsegenskaperna ska istället bestämmas med hjälp av förstörande provning.

4 Acceptanskriterier för sortering i homogena provningspartier

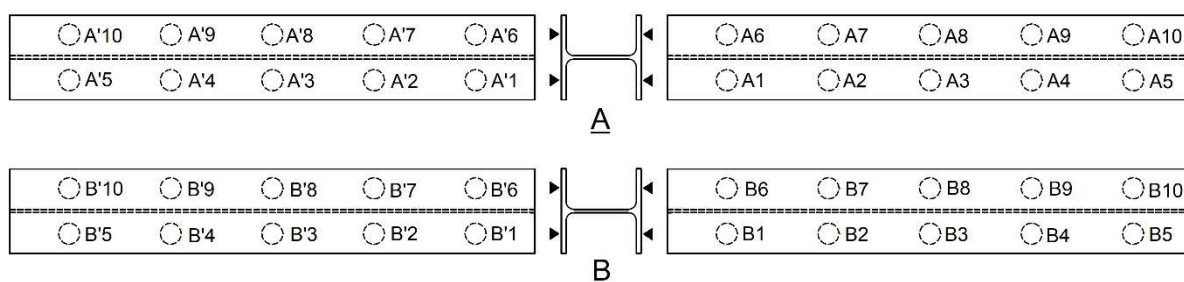
4.1 Inledning

Hårdhetsmätningar används för att bekräfta att profiler i ett kontrollparti har liknande mekaniska egenskaper. Konverteringen mellan hårdhet och brottgräns innebär dock en inte obetydlig spridning av resultaten, se kapitel 3, dvs att varierande hårdhetsvärden kan förväntas även vid konstant brottgräns. Även hårdhetsmätningen i sig bidrar till ytterligare spridning.

Vilken spridning är acceptabel och hur kan man upptäcka blandade provningspartier?

4.2 Undersökningar

Variationen inom ett homogent provningsparti undersöktes med hjälp av två HEA160 profiler i S355J2+M från samma tillverkningsparti. Profilerna var ca en meter långa och 20 mätområden preparerades per balk: 5 områden jämnt fördelade per flänshalva, se figur 4-1. Ytorna bearbetades med vinkelslip och lamellslipskivor för metall i två steg, först med kornstorlek 40 och sedan med kornstorlek 120. Mätningarna gjordes inom ett kvadratcentimeter stort område i mitten av varje preparerad yta.



Figur 4-1 Mätområden och beteckningar.

Hårdhetsprovning genomfördes med en UCI hårdhetsmätare av modell NewSonic SonoDur 3 med tryckkraft motsvarande HV10, dvs 98 N

Hårdhetsmätaren kontrollerades före och efter mot en kalibrerad platta med hårdhet 157,1 HV10. Genomsnittet avvek med mindre än 5 HV10 och resultatens spridning var ca 2%, se tabell 4-1.

Tabell 4-1 Resultat av initial och avslutande kontroll mot kalibrerad platta

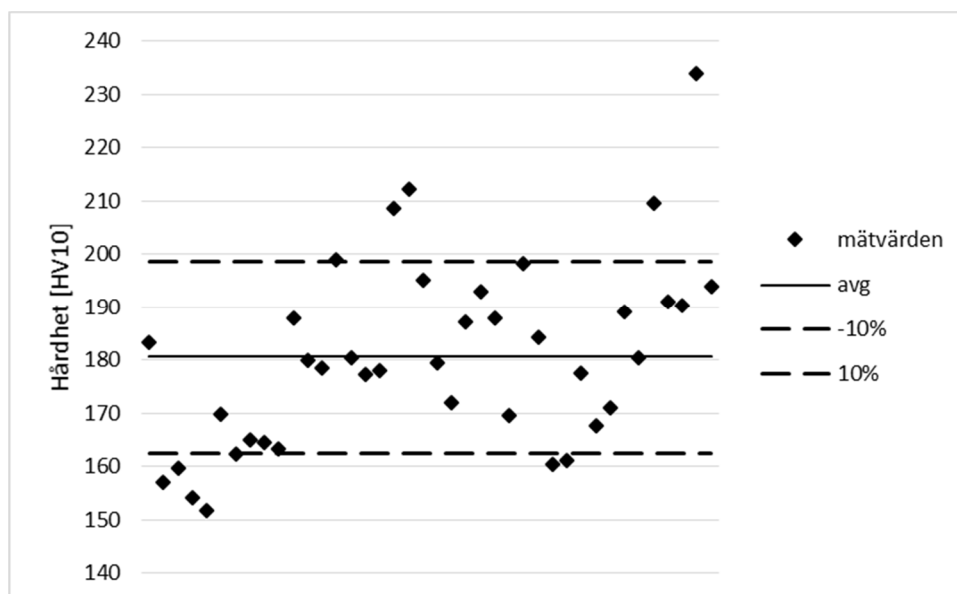
	Före	Efter
1	148,0	156,9
2	153,6	153,1
3	153,5	155,5
4	155,7	151,2
5	159,0	156,3
6	155,0	146,4
7	159,0	153,8
8	160,8	153,6
9	156,2	153,0
10	158,9	155,2
μ	156,0	153,5
σ	3,8 (2,4%)	3,0 (2,0%)

Resultaten av mätningarna sammanfattas i tabell 4-2. Den genomsnittliga hårdheten för samtliga mätområden är 180,6 HV10 med en standardavvikelse på 17,7 HV10, dvs ca 10%.

Tabell 4-2 Hårdhetsvärden - genomsnitt av 5 mätningar och variationen inom ett område, HEA160 i S355J2+M

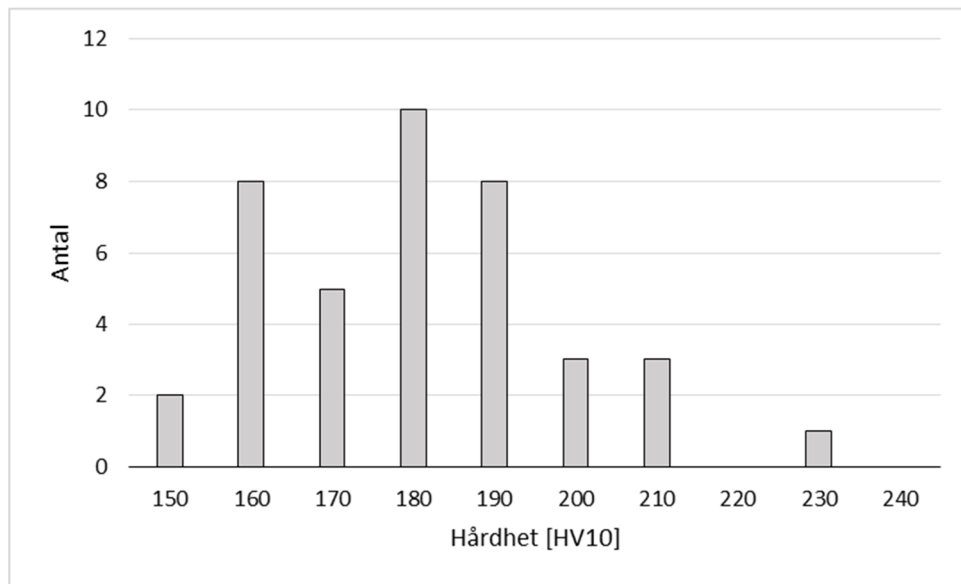
	μ	σ		μ	σ
A1	183,3	14,1%	A'1	179,4	7,4%
A2	157,0	2,4%	A'2	172,0	10,4%
A3	159,7	6,5%	A'3	187,0	8,6%
A4	154,2	1,6%	A'4	192,9	12,4%
A5	151,8	3,6%	A'5	187,9	7,8%
A6	169,7	11,2%	A'6	169,6	12,1%
A7	162,3	3,0%	A'7	198,1	23,1%
A8	164,9	1,0%	A'8	184,3	23,1%
A9	164,4	4,3%	A'9	160,4	3,5%
A10	163,2	4,3%	A'10	161,1	4,7%
B1	187,8	8,2%	B'1	177,6	6,8%
B2	179,9	8,5%	B'2	167,6	4,3%
B3	178,4	10,4%	B'3	171,1	5,0%
B4	199,0	7,1%	B'4	189,2	8,7%
B5	180,4	6,4%	B'5	180,5	7,1%
B6	177,4	18,1%	B'6	209,5	12,7%
B7	178,0	8,2%	B'7	191,0	8,3%
B8	208,6	10,0%	B'8	190,3	5,1%
B9	212,2	13,3%	B'9	234,0	10,4%
B10	195,0	18,1%	B'10	194,0	18,5%

Figur 4-2 visar samtliga mätvärden samt genomsnittet och avvikelser på -10 respektive +10%. Totalt tolv mätvärden av fyrtio avviker med mer än 10% från genomsnittet (sju underskridande och fem överskridande).



Figur 4-2 Grafisk framställning av resultaten, HEA160 i S355J2+M

Resultaten kan också presenteras i ett histogram för att visualisera fördelningen, se figur 4-3.



Figur 4-3 Histogram, HEA160 i S355J2+M

Det antas att mätvärden är normalfördelade. Detta antagande kan undersökas med hjälp av två normalitetstester: Anderson-Darling och Shapiro-Wilk.

Anderson-Darling skattningsparametern beräknas som:

$$A^2 = -n - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (2i-1) \left[\ln \Phi \left(\frac{x_{(i)} - \bar{x}}{s} \right) + \ln \left(1 - \Phi \left(\frac{x_{(n+1-i)} - \bar{x}}{s} \right) \right) \right]$$

där

n är antalet värden i uppsättningen;

$x_{(i)}$ är ett sorterat värde med index i så att $x_{(i+1)} \geq x_{(i)}$;

\bar{x} är genomsnittet, och;

Φ är den kumulativa fördelningsfunktionen för en standard normalfördelning med parametrarna $\mu = 0$ och $\sigma = 1$.

Denna korrigeras för antalet värden enligt:

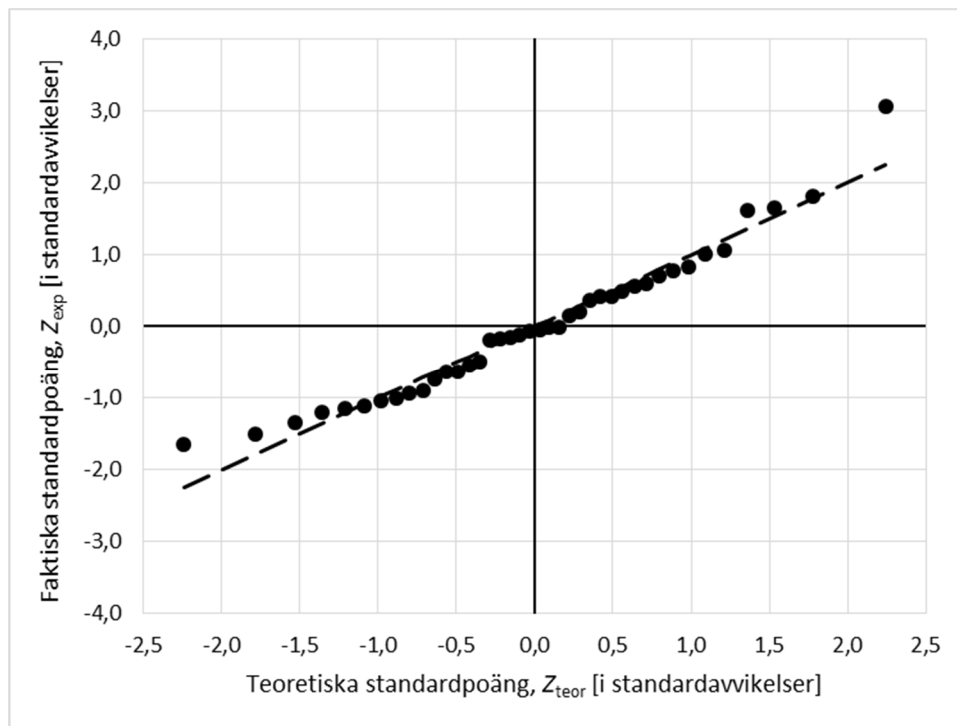
$$A^{*2} = A^2 \left(1 + \frac{0,75}{n} + \frac{2,25}{n^2} \right)$$

Sannolikheten att felaktigt förkasta nollhypotesen (=att värdena är normalfördelade) approximeras med:

$$p = \begin{cases} e^{1,2937-5,709A^{*2}+0,0186A^{*4}} & \text{om } 0,60 \leq A^{*2} \\ e^{0,9177-4,279A^{*2}-1,38A^{*4}} & \text{om } 0,34 \leq A^{*2} < 0,60 \\ 1 - e^{-8,318+42,796A^{*2}-59,938A^{*4}} & \text{om } 0,20 \leq A^{*2} < 0,34 \\ 1 - e^{-13,436+101,14A^{*2}-223,73A^{*4}} & \text{om } A^{*2} < 0,20 \end{cases}$$

Med värden i tabell 4-2 fås $A^2 = 0,33$ och $A^{*2} = 0,34$.

$$p = e^{0,9177-4,279 \times 0,34-1,38 \times 0,34^2} = 0,50 \gg \alpha = 0,05.$$



Figur 4-5 Q-Q diagram, HEA160 S355J2+M

Den sammantagna bedömningen är att värdena är normalfördelade vilket överensstämmer med tidigare undersökningar av hårdhetsmätningar [6].

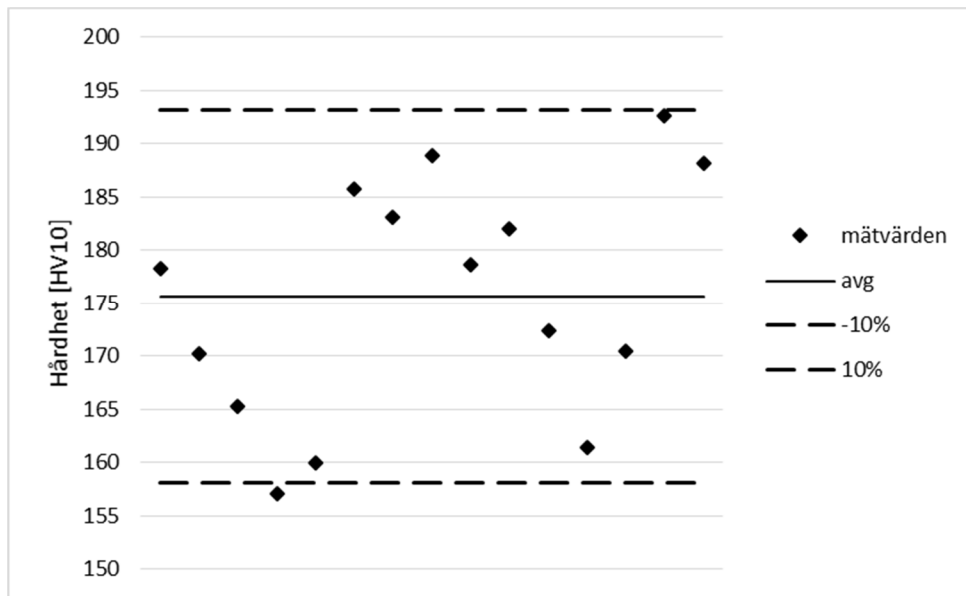
Variationen inom ett homogent provningsparti undersöktes även hos ett varmformat konstruktionsrör vars stålsort var obekräftad men kunde antas vara S355. Profilen var ca en meter lång och 15 mätområden preparerades: 5 områden per sida exklusive sidan med den longitudinella svetsen. Ytorna bearbetades och hårdheten mättes på samma sätt som för de två HEA160 profiler i S355J2+M.

Resultaten av mätningarna sammanfattas i tabell 4-3. Den genomsnittliga hårdheten för samtliga mätområden är 175,6 HV10 med en standardavvikelse på 11,3 HV10, dvs ca 7%.

Tabell 4-3 Hårdhetsvärden - genomsnitt av 5 mätningar och variationen inom ett område, VKR

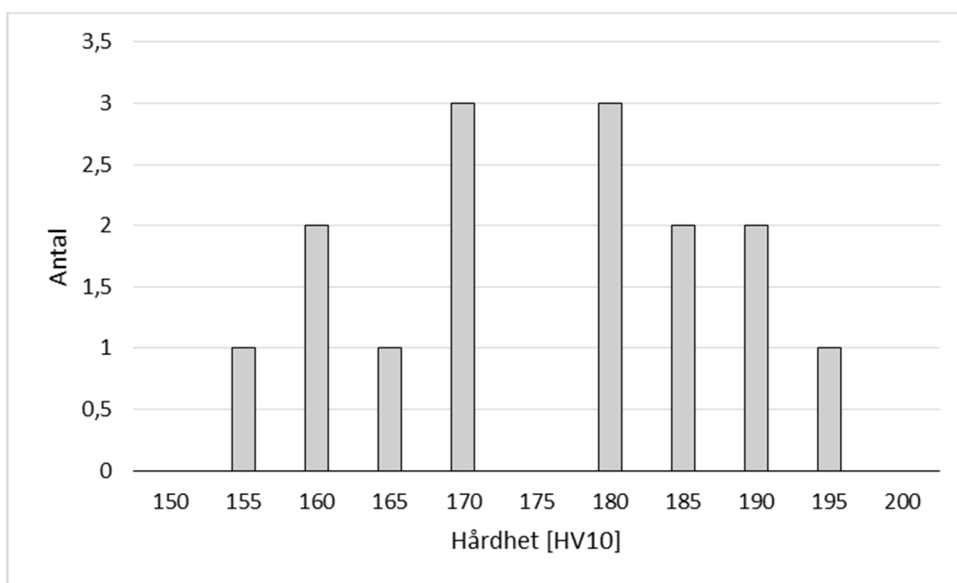
	M	σ		μ	σ
1	178,3	9,0%	9	178,7	4,5%
2	170,2	11,6%	10	182,0	12,7%
3	165,2	1,1%	11	172,4	6,6%
4	157,1	4,3%	12	161,5	1,7%
5	160,0	1,8%	13	170,5	7,9%
6	185,8	10,2%	14	192,6	24,3%
7	183,1	8,3%	15	188,2	24,1%
8	188,9	9,1%			

Figur 4-6 visar samtliga mätvärden samt genomsnittet och avvikelser på -10 respektive +10%. Ett enda värde avviker med mer än 10% från genomsnittet.



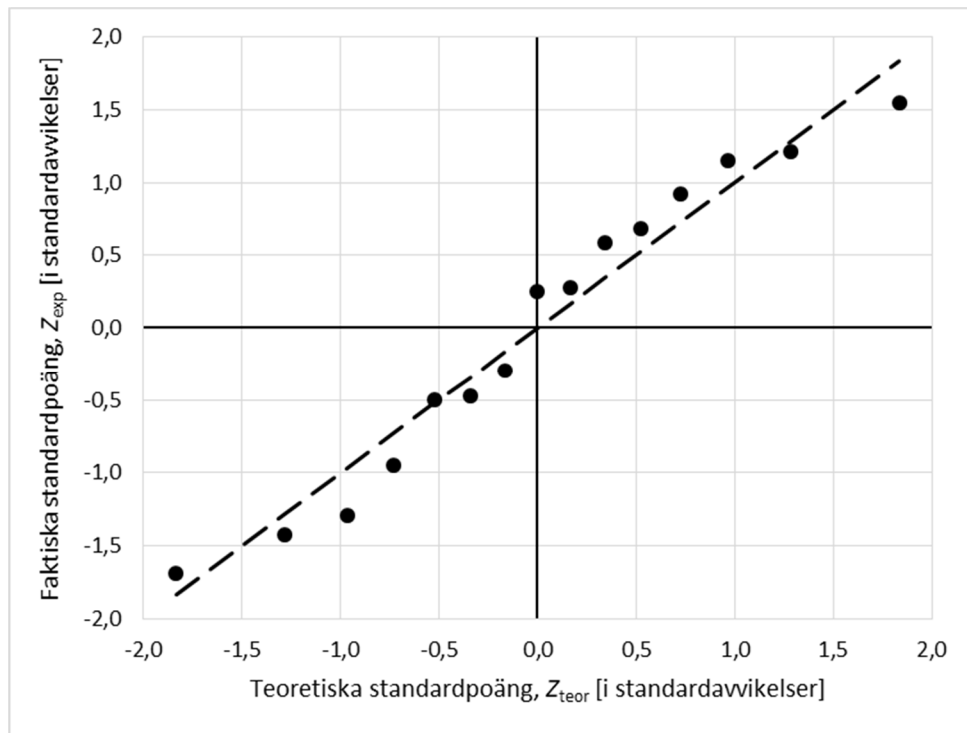
Figur 4-6 Grafisk framställning av resultaten, VKR

Resultaten kan också presenteras i ett histogram för att visualisera fördelningen, se figur 4-7.



Figur 4-7 Histogram, VKR

Q-Q diagrammet för normalfördelning visas i figur 4-8. Punkterna överensstämmer mycket bra med den teoretiska diagonalen vilket tyder på att värdena är normalfördelade.



Figur 4-8 Q-Q diagram, VKR

Den sammantagna bedömningen är att värdena är normalfördelade även här.

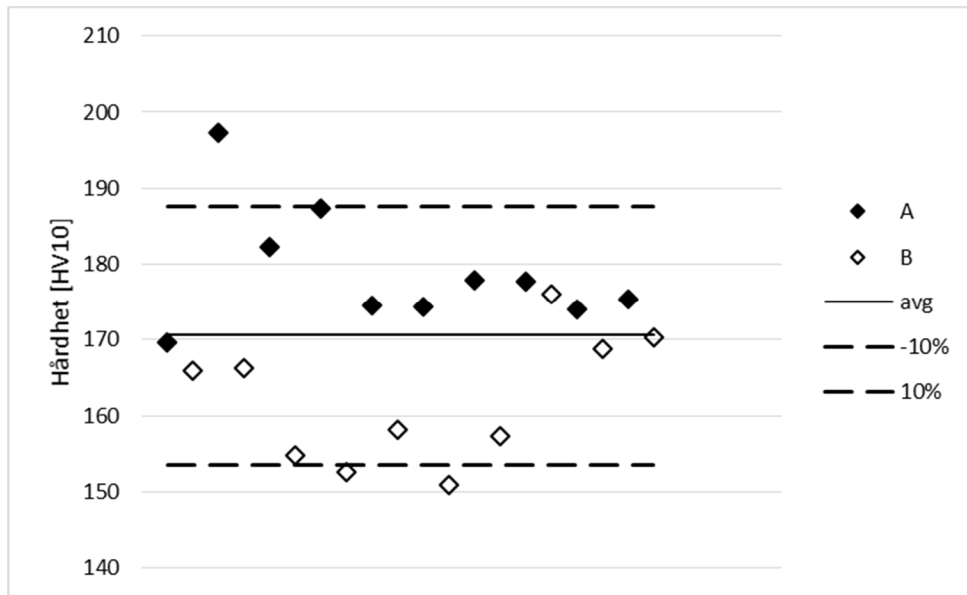
I fortsättningen kan vi utgå ifrån att hårdhetsmätningar från en homogen grupp profiler är normalfördelade med en varians på upp till 10%.

4.3 Diskussion

I *Structural Steel Reuse – Assessment, Testing and Design Principles* (SCI, P427, 2019) anges att profiler vars hårdhet ligger inom 10% av medelvärdet för samtliga profiler i gruppen kan anses ingå i samma kontrollparti. Profiler vars hårdhet avviker mer än 10% från medelvärdet sorteras bort.

Ett sådant kriterium är tilltalande enkelt men kan samtidigt missa partier med blandade egenskaper och utesluta för många profiler från homogena partier, särskilt vid stora antal profiler.

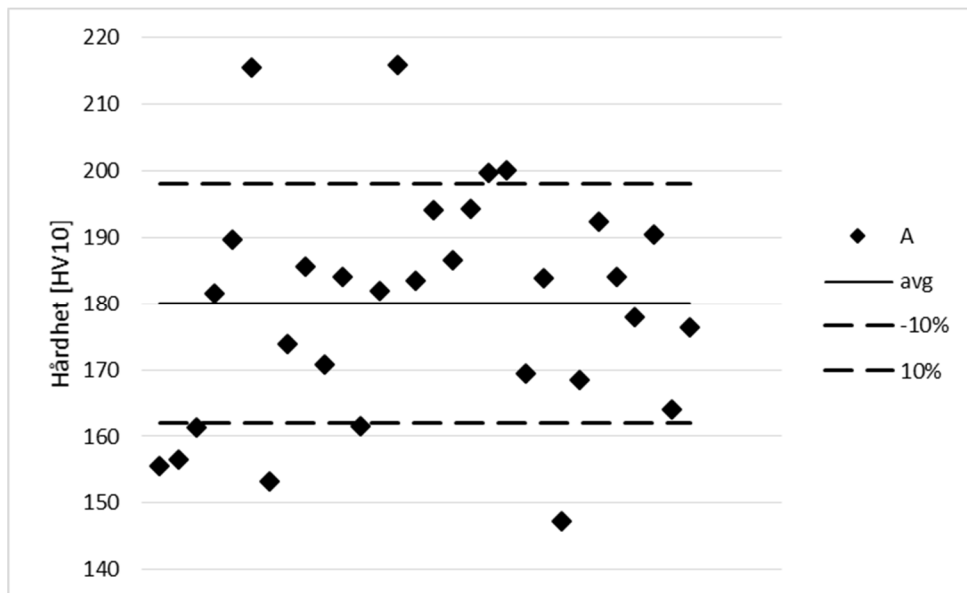
I figur 4-9 visas ett exempel av ett kontrollparti med blandade egenskaper bestående av tio profiler av typ A ($\mu = 180$ HV10 och $\sigma = 10$ HV10) och tio profiler av typ B ($\mu = 160$ HV10 och $\sigma = 8$ HV10). Hårdhetsvärdena är slumpmässigt genererade.



Figur 4-9 Exempel på resultat från ett blandat kontrollparti

Genomsnittet för hela partiet hamnar på 170,6 HV10 och totalt tre profiler avviker mer än 10%. Av de sju återstående profilerna är åtta av typ B och nio av typ A, dvs kontrollpartiet är inte homogent och sannolikheten att materialegenskaper för hela partiet tas fram med osäker utgång utifrån den starkaste profiltypen A är 53%.

Å andra sidan är sannolikheten stor att många profiler från stora kontrollpartier felaktigt utesluts, ju större parti desto fler felaktigt uteslutna. I figur 4-10 är ett exempel på resultat från ett homogent kontrollparti med 30 individer där genomsnittet för hela partiet är 180,0 HV10 och standardavvikelsen är 9,5% (värdena är slumpmässigt genererade och normalfördelade). Tio profiler, dvs 33% av kontrollpartiet, uppfyller inte kravet om 10% avvikelse från genomsnittet.

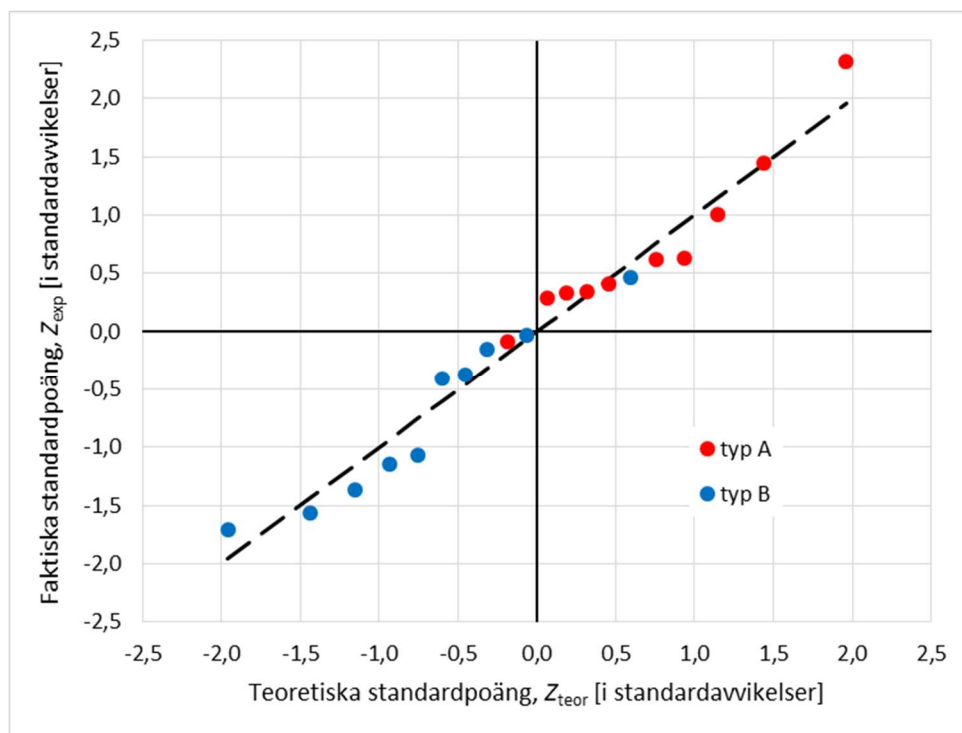


Figur 4-10 Exempel på resultat från ett homogent kontrollparti (standardavvikelse 7%)

Enligt resultat från avsnitt 4.2 kan standardavvikelsen hos mätvärden från ett homogent kontrollparti vara upp till 10%. Avvikelsekravet på 10% motsvarar därför en standardavvikelse och vid en

normalfördelning betyder detta att ca 32% av profiler behöver uteslutas. Detta har en orimligt negativ inverkan på ekonomin när många profiler utesluts felaktigt.

Att upptäcka kontrollpartier med blandade egenskaper kan vara svårt om standardavvikelser är stora och medelvärden är nära varandra. I figur 4-11 visas Q-Q diagrammet för exemplet från figur 4-9. Punkterna överensstämmer väl med den teoretiska diagonalen vilket betyder att samtliga värden är att betrakta som normalfördelade trots att de kommer från profiler med olika egenskaper. Notera även överlappningen där de högsta värden för typ B är större än de lägsta för typ A.



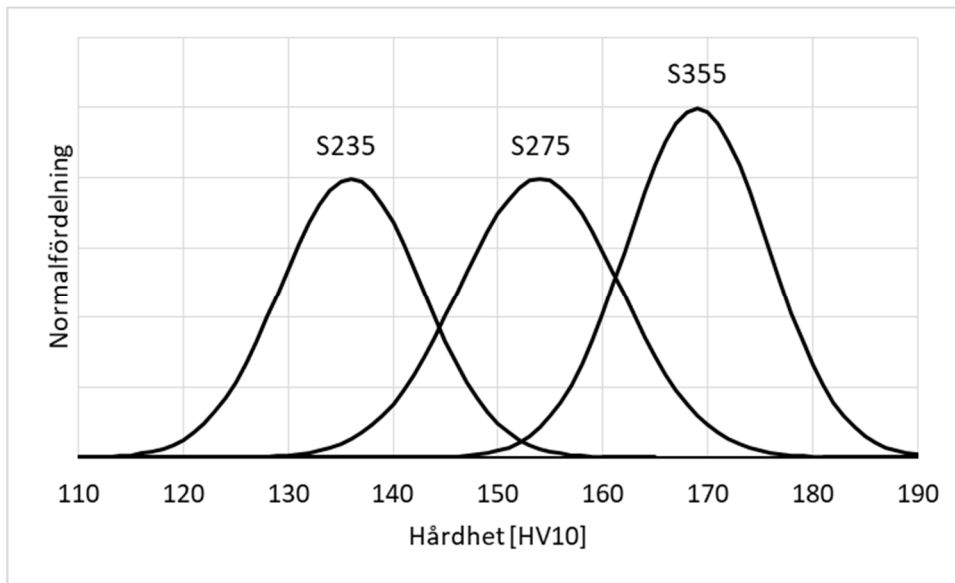
Figur 4-11 Exempel på Q-Q diagram från ett kontrollparti med blandade egenskaper (profiler av typ A och B)

Den förväntade brottgränsen (medelvärde) och motsvarande hårdhet för de tre vanligaste stålsorterna redovisas i tabell 4-4. Brottgräns och dess standardavvikelse är hämtade i prEN 1993-1-1:2020 bilaga E. Omvandlingen till hårdhet görs enligt SS-EN ISO 18265 bilaga A. Hårdheten är i praktiken direkt proportionell till brottgränsen. Därför är standardavvikelsen i procent oförändrad vid omvandlingen.

Tabell 4-4 Förväntad brottgräns och hårdhet.

Stålsort	Brottgräns [MPa]	Hårdhet enl. [HV10]	Standardavvikelse
S235	432	136	5%
S275	492	154	5%
S355	541	169	4%

Överlappningen av normalfördelningarna är inte obetydlig, se figur 4-12.



Figur 4-12 Överlappning av normalfördelningar för brottgräns omvandlat till hårdhet för konstruktionsstål S235, S275 och S355.

Inom ett parti med given brottgräns (som antas vara den samma hos samtliga profiler) medför hårdhetsmätningen en ytterligare variation som förstörar den faktiska överlappningen av mätresultat från profiler av olika stålsorter.

Detta gör det svårt att upptäcka kontrollpartier med blandade egenskaper.

Även om dessa upptäcks blir det praktiskt omöjligt att urskilja och sortera profiler med olika egenskaper.

Däremot är det möjligt att göra en bedömning på säker sida och minimera risken för osäkra felbedömningar genom att utgå ifrån profilen med det lägsta hårdhetsvärdet. Detta undersöks i fortsättningen.

Om ett kontrollparti består av två profiltyper, A och B, där B har sämre hållfasthetsegenskaper (blå lägre brottgräns) kan hela partiet sorteras antingen som A eller B. Ett antal profiler bedöms korrekt oavsett utfallet av bedömningen men två sorts fel kan uppstå, antingen en felaktig nedgradering av A profiler eller en felaktig uppgradering av B profiler. Nedgradering av de starkare profilerna är olyckligt men medför ingen risk medan en uppgradering av de svagare profilerna medför en säkerhetsrisk.

Möjliga bedömningar och utfall sammanfattas i tabell 4-5 nedan.

Tabell 4-5 Möjliga bedömningar och utfall.

Bedömning	Utfall
Samtliga profiler är av typ B (Sannolikhet: x_B)	Profiler A: fel bedömning Nedgradering (säker)
	Profiler B: korrekt bedömning
Samtliga profiler är av typ A (Sannolikhet: $1-x_B$)	Profiler A: korrekt bedömning
	Profiler B: fel bedömning Uppgradering (osäker)

Om proceduren används för att bedöma egenskaper hos ett oändligt antal kontrollpartier med blandade egenskaper kan andelen felaktigt uppgraderade profiler beräknas som:

$$n_{\text{fel}} = (1 - x_B) \cdot n_B$$

där

x_B är sannolikheten att samtliga profiler bedöms vara av typ B, och;

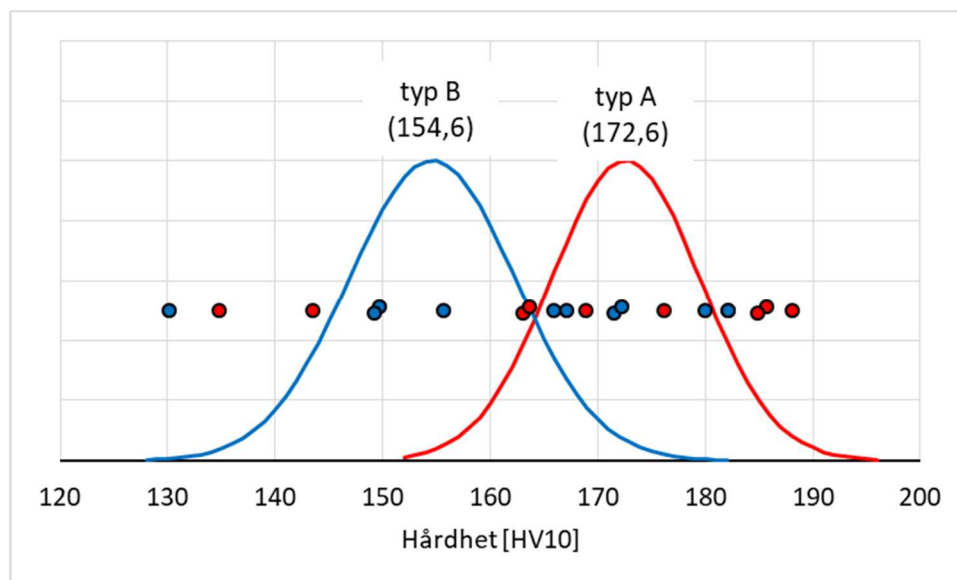
n_B är andelen profiler av typ B i kontrollpartiet.

Sannolikheten att samtliga profiler i ett kontrollparti med blandade egenskaper (typ A och B) bedöms vara av den svagare typen (B) kan tas fram med hjälp av simuleringar.

För givna värden på andelen B profiler har 500 kontrollpartier genererats slumpmässigt. Samtliga partier innehöll totalt 20 profiler. Typ A motsvarade stålsort S355 med en normalfördelad hårdhet på 169 +/- 4% och typ B motsvarade stålsort S275 med en normalfördelad hårdhet på 154 +/- 5%. Hårdhetsmätningar antogs normalfördelade med ett genomsnitt från fördelningar ovan och en standardavvikelse på 5 respektive 10%.

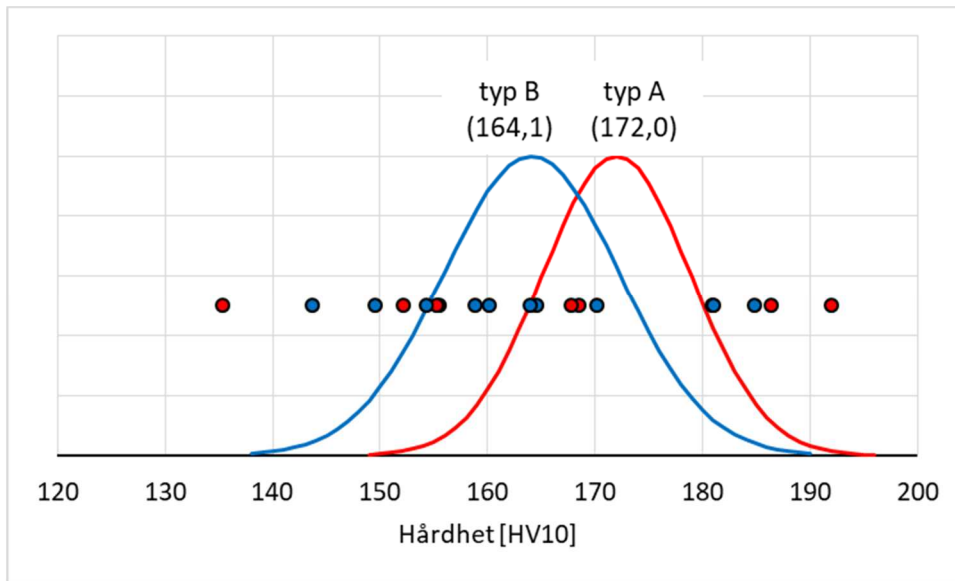
Ett kontrollparti i sin helhet bedömdes vara av samma typ som den profil som hade det lägsta hårdhetsvärdet av samtliga 20 profiler tillhörande detta parti.

Figur 4-13 visar data från en simulering där profiler av typ A och B fick genomsnittliga hårdhetsvärden på 172,6 respektive 154,6. De teoretiska normalfördelningarna för hårdhetsmätningar med en standardavvikelse på 10% redovisas som röd respektive blå kurva medan de genererade värdena visas på samma diagram som enstaka punkter. I detta exempel bestod kontrollpartiet av 10 profiler av typ A och 10 profiler av typ B. Det lägsta hårdhetsvärdet (ca 130) var från en profil av typ B varpå hela partiet skulle bedömas, efter förstörande provning av denna profil, vara av typ B.



Figur 4-13 Data från en simulering, exempel 1

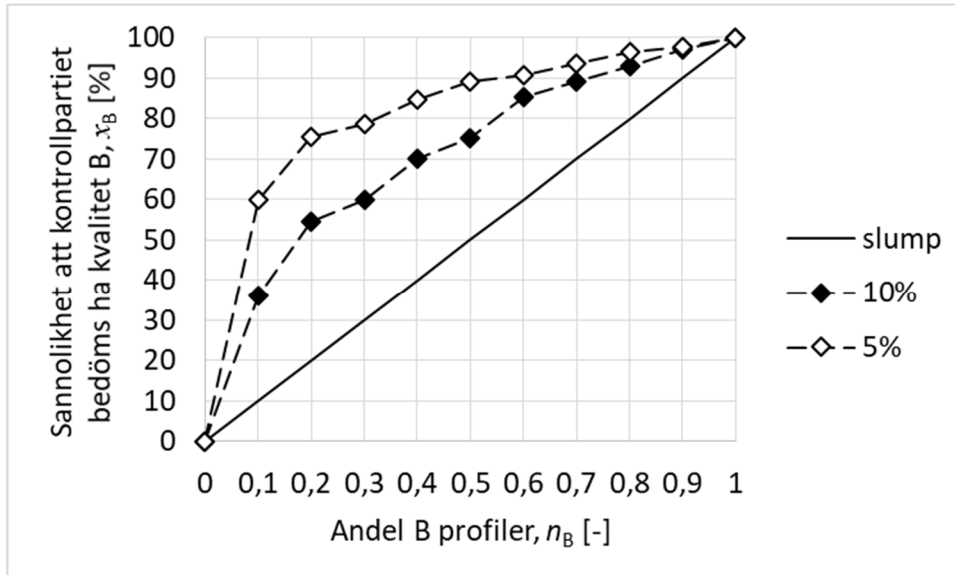
Vid en annan simulering med samma grundförutsättningar, se figur 4-14, blev de genomsnittliga hårdhetsvärden (172,0 respektive 164,1) närmare varandra och det lägsta hårdhetsvärdet var denna gång från en profil av typ A vilket ledde till en osäker bedömning av hela partiet.



Figur 4-14 Data från en simulering, exempel 2

Sannolikheten att ett kontrollparti bedöms vara av typ B ökar med en ökande andel B profiler. Även standardavvikelsen hos hårdhetsmätningar påverkar denna sannolikhet: ju större standardavvikelsen blir desto större blir sannolikheten att en profil av typ A får ett hårdhetsvärde lägre än profiler av typ B.

Antalet partier som bedömdes vara av typ B registrerades för samtliga simuleringar med liknande förutsättningar (andel B profiler och standardavvikelse hos hårdhetsmätningar) och resultaten presenteras i procent i figur 4-15.



Figur 4-15 Resultat av statistiska simuleringar – Sannolikhet att kontrollpartier med blandade stålsorter bedöms vara av den svagaste sorten (20 profiler, S275/S355).

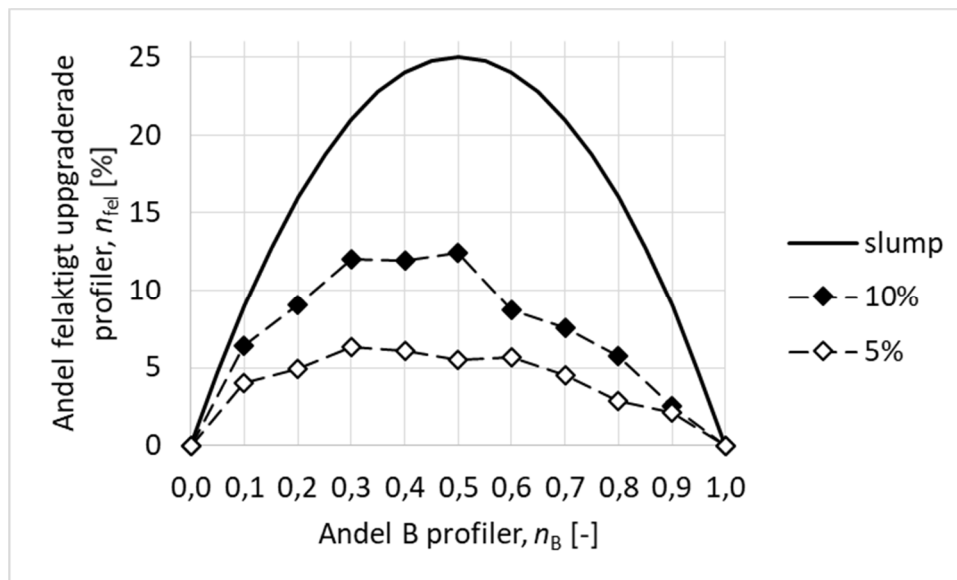
Diagonalen som kallas "slump" i figur 4-15 anger sannolikheten att göra en bedömning på säker sida om profilen som undergår förstörande provning väljs slumpmässigt. Om ett kontrollparti innehåller få profiler av sämre stålsort är denna sannolikhet mycket låg.

Däremot, om hårdhetsmätningar görs och profilen med den minsta uppmätta hårdheten väljs till förstörande provning kan sannolikheten att göra en säker bedömning ökas avsevärt. Denna

sannolikhet är beroende av standardavvikelsen för hårdhetsmätningarna och kurvor för 5 respektive 10% visas i figur 4-15.

Ju mindre andel svagare profiler desto svårare att upptäcka dem. Å andra sidan utgör de en mindre andel av den totala mängden material som bedöms.

Andelen felaktigt uppgraderade profiler om samtliga kontrollpartier består av två profiltyper (blandade kontrollpartier) visas som en funktion av andelen B profiler i figur 4-16.



Figur 4-16 Resultat av statistiska simuleringar – Andel felaktigt uppgraderade profiler (20 profiler per kontrollparti, S275/S355).

Andelen profiler från blandade kontrollpartier som bedöms felaktigt på osäker sida blir uppskattningsvis i genomsnitt:

- 4% vid standardavvikelser för hårdhetsmätningarna på 5% , och
- 8% vid standardavvikelser för hårdhetsmätningarna på 10%.

Eftersom profiler sorteras i kontrollparti utifrån ursprung och funktion förväntas i praktiken de flesta kontrollpartier vara homogena.

Den faktiska andelen osäkra felbedömningar vid återbruk förväntas därmed vara mycket mindre än andelen profiler med lägre hållfasthet än materialklassen anger vid nytillverkning. 5% av nya profiler har lägre sträckgräns än det karakteristiska värdet för materialklassen.

4.4 Rekommendationer

Hårdhetsmätning utförs på samtliga profiler i ett kontrollparti.

Hårdhetsvärdet för en profil tas som medelvärdet av fem mätningar.

Ett Q-Q diagram kan användas för att undersöka kontrollpartiets homogenitet. Vid en tydlig avvikelse från normalitet kan det vara ekonomiskt motiverat att dela kontrollpartiet i två nya kontrollpartier som visar en normalfördelning var för sig.

I MVR BS04:2021 anses att förstörande provning kan utföras på material från en slumpmässigt vald profil ur kontrollpartiet. För att uppnå en större säkerhet görs ett avsteg från dessa rekommendationer och egenskaperna hos profiler från ett kontrollparti med normalfördelade hårdhetsvärden fås genom förstörande provning på profilen med det minsta hårdhetsvärdet.

5 Kontroll av dimensioner och toleranser

Samtliga komponenter mått kontrolleras med avseende på dimensioner och toleranser. Till tvärsnittsegenskaper används ett skjutmått med en mätnoggrannhet på minst 0,5 mm.

Uppmätta dimensioner och toleranser kontrolleras mot relevant produktstandard och tillämpliga delar av SS-EN 1090-2, bilaga B. Komponenter som inte överensstämmer med relevant produktstandard och tillämpliga delar av SS-EN 1090-2, bilaga B, åtgärdas eller kasseras.

Resultatet av kontrollen av dimensioner och toleranser dokumenteras.

6 Oförstörande provningar

6.1 Oförstörande hårdhetsprovning

6.1.1 Bearbetning av ytan inför hårdhetsprovning

6.1.1.1 Undersökningar och resultat

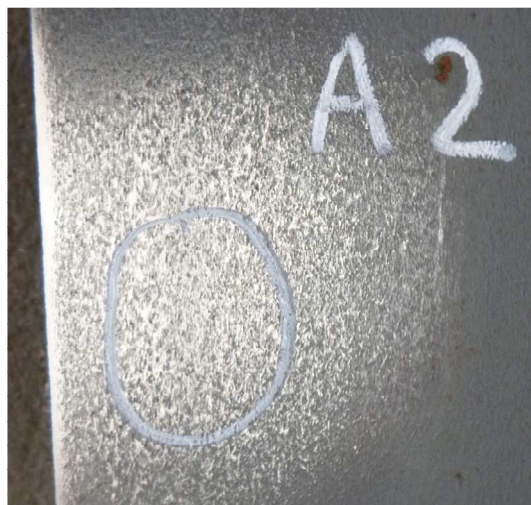
Proceduren för hårdhetsmätning testades först på en profil (HEA180) med kända materialegenskaper. Enligt DIN 50159-1 ska ytans råhet vid mätning med en tryckkraft på 98 N (HV10) vara $Ra \leq 1 \mu\text{m}$. För stål kan en acceptabel råhet uppnås genom slipning med kornstorlek 180 eller finare.

Först användes en excenterslip med slipondeller för trä med kornstorlek 80, 120 och 240, se figur 6-1.



Figur 6-1 Excenterslip och slipondeller för trä.

Bearbetningen var mycket ytlig och trängde inte genom valshuden. Ytan blev ojämn, se figur 6-2.



Figur 6-2 Exempel på yta efter bearbetning med excenterslip och sandpapper med kornstorlek 80, 120 och 240.

Tre områden (A1, A2 och A3) bearbetades på detta sätt och tio mätningar gjordes i vardera. Resultaten anges i tabell 6-1.

Tabell 6-1 Hårdhetsmätningar på HEA180, yta bearbetad med excenterslip.

	Mätområde		
	A1	A2	A3
1	162,5	157,3	165,4
2	148,8	164,9	161,9
3	195,0	169,5	202,6
4	159,9	164,9	174
5	229,1	183,4	193,2
6	170,9	186,2	193,9
7	161,4	163,7	169,7
8	164,0	194,2	236,7
9	162,7	202,3	161,2
10	186,5	157,5	139,9
μ	174,1	174,4	179,9
σ	13,5%	9,1%	15,2%

Den genomsnittliga hårdheten varierar lite mellan områden men resultatens spridning inom ett givet område är stor.

För att kunna avverka material mer effektivt användes en vinkelslip med lamellslipskivor för metall, se figur 6-3. Lamellslipskivor med kornstorlek finare än 120 visade sig svåra att hitta i handeln. Därför användes kornstorlek 60 och 120.



Figur 6-3 Vinkelslip med lamellslipskivor för metall.

Tre bearbetningsmetoder undersöktes på en av HEM-profilerna (M1), se figur 6-4:

- A. Vinkelslip, K120
- B. Vinkelslip, K60 – Vinkelslip, K120 – Excenterslip, K240
- C. Vinkelslip, K60 – Vinkelslip, K120



Figur 6-4 Tre områden bearbetades med olika metoder.

Tabell 6-2 Hårdhetsmätningar [HV10] på HEM120, jämförelse mellan olika bearbetningsmetoder.

	Bearbetningsmetod		
	A	B	C
1	152,4	125,9	134,1
2	137,8	122,3	132,2
3	154,6	128,9	129,8
4	160,3	123,5	136,1
5	168,4	122,7	135,6
6	143,9	131,7	134,3
7	156,2	130,5	128,9
8	155,2	128	132,8
9	155,1	125,2	128,5
10	155,8	130,3	135,6
μ	154,0	126,9	132,8
σ	5,4%	2,7%	2,2%

Oavsett metod är spridningen hos mätresultat för ytor bearbetade med vinkelslip mycket mindre än när en excenterslip användes, se tabell 6-2. Bearbetning med enbart fin kornstorlek (120), A, gav både en större hårdhet och större spridning. Skillnaden mellan ytor preparerade med metod B och C var liten. Spridningen i storleksordning 2-3% är tillfredställande. För att spara tid valdes metod C.

Notera att detta avviker från DIN 50159-1 där bearbetning med kornstorlek 180 eller finare rekommenderas.



Figur 6-5 Exempel på yta efter bearbetning med vinkelslip med kornstorlek 60 och 120.

Tre nya områden (B1, B2 och B3) bearbetades med metod C på HEA180 profilen och tio mätningar gjordes i vardera. Foto på bearbetad yta B1 enligt figur 6-5. Resultaten anges i tabell 6-3.

Tabell 6-3 Hårdhetsmätningar [HV10] på HEA180, yta bearbetad med vinkelslip (kornstorlek 60 och 120).

	Mätområde		
	B1	B2	B3
1	172,0	167,6	169,3
2	155,6	162,5	148,1
3	162,9	182,8	150,9
4	158,5	161,7	148,1
5	161,4	163,9	164,6
6	182,8	155,3	154,1
7	183,5	161,3	181,5
8	163,4	156,0	166,0
9	154,9	156,6	165,9
10	155,9	150,7	182,1
μ	165,1	161,8	163,1
σ	6,5%	5,5%	7,7%

Den genomsnittliga hårdheten är något mindre efter bearbetning med metod C. Detta är konsekvent med tidigare resultat på HEM120 profilen. Resultatens spridning är något större än hos HEM120 profilen men har ändå halverats jämfört med bearbetning med excenterslip.

Kompletterande provningar gjordes vid ett annat tillfälle på två HEA160 profiler i S355J2+M från samma tillverkningsparti.

Mätområde preparerades med vinkelslip och lamellslipskivor för metall med allt finare kornstorlek: 80, 120, 180 och 320, se figur 6-6.



Figur 6-6 Lamellslipkivor med kornstorlek 80, 120, 180 och 320.

Tio mätområden (1-10) preparerades på vardera balken (betecknade A respektive B) och fem mätningar gjordes i varje område, se figur 6-7.



Figur 6-7 Mätområden 1 till 10 på balkarna A och B.

Spridningen mellan de fem mätningarna inom ett givet område undersöktes. I tabell 6-4 sammanfattas resultaten. Inom det undersökta intervallet hade lamellslipskivans kornstorlek ingen tydlig påverkan på spridningen.

Tabell 6-4 Spridning av mätresultat inom ett givet område [%] beroende av lamellslipskivans kornstorlek.

	80	120	180	320	120
Min	0,7	3,3	1,4	1,7	1,3
Max	18,6	16,6	17,0	20,9	22,6
Median	5,2	6,1	6,9	7,1	5,9
Genomsnitt	7,0	8,5	7,5	8,6	9,0

Hårdheten inom ett område togs som genomsnittet av fem mätningar. Inom det undersökta intervallet hade lamellslipskivans kornstorlek ingen tydlig påverkan på resultaten, se tabell 6-5. Standardavvikelsen är i princip oförändrad och genomsnittets variation på +/- 3 HV10 är mycket liten.

Tabell 6-5 Hårdhet [HV10] beroende av ytans råhet.

	80	120	180	320	120
Min	161,4	158,2	154,5	153,4	153,0
Max	212,1	189,8	219,6	218,5	199,5
Median	173,1	171,1	175,9	177,8	168,5
Genomsnitt	178,8	173,4	176,8	178,8	172,7
Standardavvikelse	15,8	9,1	15,5	15,6	14,6

6.1.1.2 Rekommendationer

Det är viktigt att mätningar görs på grundmaterialet och inte valshuden. Därför rekommenderas att ytan bearbetas med effektiva verktyg med god avverkningsförmåga.

Ytans råhet visar sig ha lite påverkan på resultaten om den slipas med kornstorlek inom intervallet 80-320.

Det rekommenderas att ytan bearbetas med vinkelslip och lamellslipskivor för metall i två steg:

1. med kornstorlek 40 eller 60, och;
2. med kornstorlek 120.

6.1.2 Hårdhetsprovning

Hårdhetsprovning utförs med UCI metod (Vickers) enligt DIN 50159 med tryckkraft motsvarande HV10, dvs 98 N. I denna studie användes en hårdhetsmätare av modell NewSonic SonoDur 3 och hårdheten uppmättes och beräknades som medelvärdet från fem konsekutiva mätningar.

På H- och I profiler mäts hårdheten på flänsarnas yttersida ca 1/6 av profilbredden från flänskanten.

På konstruktionsrör mäts hårdheten mitt på en sida som inte svetsats.

Inför varje arbetspass kontrolleras hårdhetsmätaren mot en kalibrerad platta med hårdhet 157,1 HV10. Medelvärdet av tio mätningar får inte avvika mer än 5 HV10 från plattans angivna värde.

6.2 Oförstörande analys av kemisk sammansättning

MVR BS04:2021 anger att oförstörande analys av den kemiska sammansättningen kan användas för att bekräfta indelningen i kontrollpartier och uppskatta kolekvivalenten samt bedöma sannolikheten för högre seghetsklasser.

Mätning med gnister-OES medför extra kostnader och valdes därför bort i denna procedur.

7 Förstörande provningar

7.1 Inledning

Den förstörande provningen omfattar dragprovning, slagseghetsprovning och provning av kemisk sammansättning som för nytt stål.

För att provningsintyget ska kunna anses motsvara ett kontrollintyg 3.1 enligt SS-EN 10204 ska samtliga förstörande provningar utföras och intygas av en oberoende och ackrediterad part.

För att återbrukat material ska anses motsvara en viss stålsort (tex S355J2) måste samtliga följande egenskaper uppfylla minst samma acceptanskriterier som för nytt stål i den givna sorten enligt relevant produktstandard eller dimensioneringsstandard (Eurokod):

- Sträck- och brottgräns
- Brottförlängning
- Slagseghet
- Kemisk sammansättning och kolekvivalent

7.2 Dragprovning

Dragprovning utförs enligt EN ISO 68921 och provstycken tas ut ur stålprofilerna enligt rekommendationer i relevant produktstandard, dvs bilaga A i SS-EN 10025-1 för varmvalsat stål och bilaga C i SS-EN 10219-1 för kallformat stål.

Produktstandarderna anger minsta sträckgräns $R_{eH,min}$ och ett intervall av giltiga brottgränser R_m samt minsta brottförlängning A .

I praktiken är sträck- och brottgräns hos nytt stål i de flesta fall mycket större än de minsta tillåtna värdena.

Vid dimensionering enligt Eurokod används $R_{eH,min}$ och R_m som karakteristiska värden och partialkoefficienter är kalibrerade utifrån empiriskt fastställda statistiska fördelningar av sträck- och brottgräns som redovisas i Bilaga E i prEN 1993-1-1:2020.

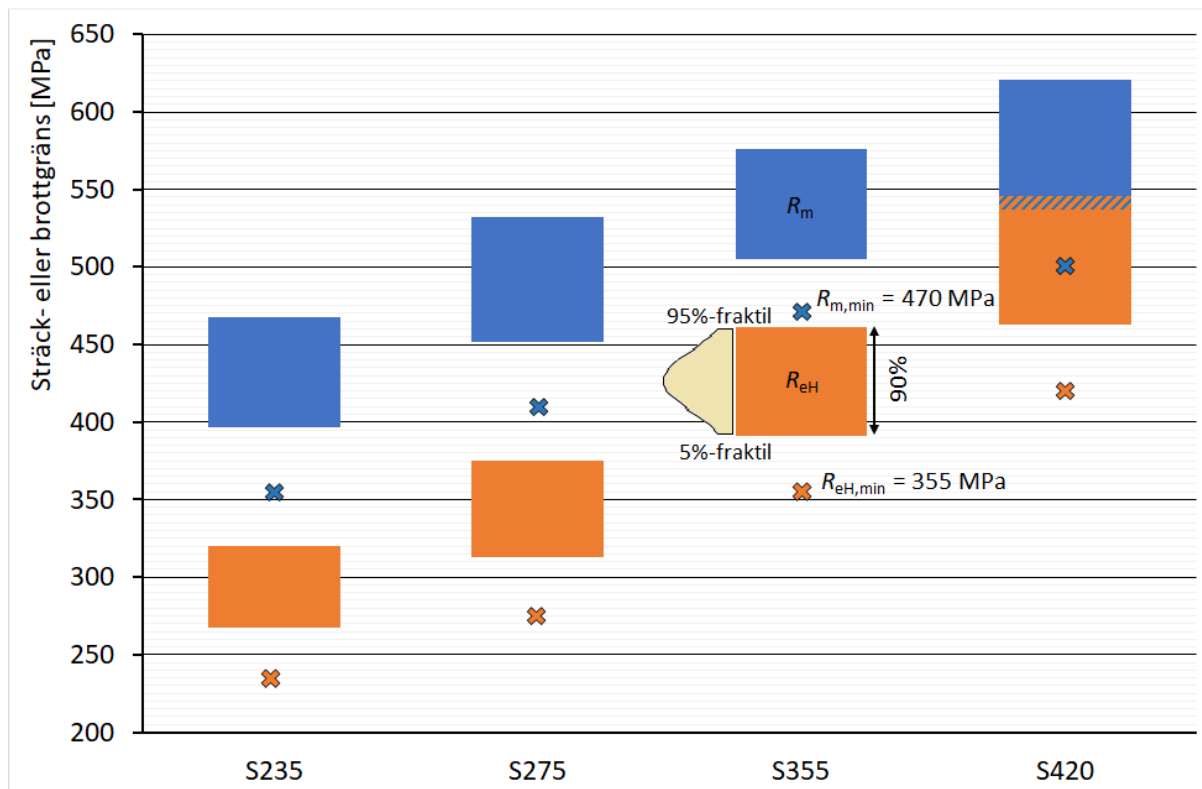
Sträck- och brottgräns hos nytt stål antas normalfördelade med parametrar i tabell 7-1.

Tabell 7-1 Parametrar för normalfördelning av mekaniska egenskaper hos de vanligaste stålsorterna enligt Bilaga E i prEN 1993-1-1:2020.

Parameter	Stålsort	Medelvärde	Standardavvikelse
Sträckgräns, f_y	S235, S275	1,25 $R_{eH,min}$	5,5%
	S355, S420	1,20 $R_{eH,min}$	5,0%
Brottgräns, f_u	S235, S275	1,20 $R_{eH,min}$	5,0%
	S355, S420	1,15 $R_{eH,min}$	4,0%

Ett rimligt acceptanskriterium för återbrukat stål kan tas som 5%-fraktilen vilket betyder att endast 5% av profilerna av en given stålsort kommer att felaktigt nedgraderas (=inte uppfylla acceptanskriteriet för den faktiska stålsorten) samtidigt som felaktig uppgradering hålls på en låg nivå. Detta synliggörs i figur 7-1 där kryssen representerar acceptanskriterierna för nytt stål och blocken visar intervaller innehållande 90% av profilerna (dvs mellan 5%- och 95%-fraktil). Överlappningen mellan blocken för angränsande stålsorter är mycket liten.

Andelen felaktiga uppgraderingar varierar mellan olika stålsorter och redovisas i tabell 7-2. Notera att, ett stål som uppgraderas tack vare goda resultat från dragprovning har faktiska egenskaper som överskrider acceptanskriterier för nytt stål hos den högre stålsorten med minst 10% och 7% för sträck- respektive brottgräns för stålsorter upp till S420. Den felaktiga uppgraderingen är därmed inte en säkerhetsrisk.



Figur 7-1 Acceptanskriterier enligt produktstandarder samt faktiska statistiska fördelningar av mekaniska egenskaper.

Tabell 7-2 Sannolikhet för felaktiga klassificeringar vid tolkning av resultat från dragprovning

Stålsort	Felaktig nedgradering	Felaktig uppgradering
S235	5%	R_{eH} : 12% / R_m : 18%
S275		R_{eH} : 1% / R_m : 30%
S355		R_{eH} : 4% / R_m : 56%
S420		R_{eH} : 71% / R_m : -%

Krav på brottförlängning och förhållandet mellan brott- och sträckgräns är strängare i produktstandarderna än i SS-EN 1993-1-1 och EKS 11. Om den återbrukade profilen ingår i en konstruktion som utförs enligt SS-EN 1090-2 och dimensioneras med Eurokod, vilket kan förutsättas, är det tillräckligt att materialet uppfyller kraven i SS-EN 1993-1-1 och EKS 11, dvs brottförlängning $\geq 14\%$ och $R_m/R_{eH} \geq 1,10$.

Kriterierna för att återbrukat stål ska kunna jämföras med en standardiserad stålsort sammanställs i tabell 7-3.

Tabell 7-3 Acceptanskriterier för ekvivalens med standardiserad stålsort, hållfasthetsegenskaper

Stålsort	$R_{eH} \geq$ [MPa]	$R_m \geq$ [MPa]	Brottförlängning ($L_0 = 5,65vA_0$)	R_m/R_{eH}
S235	267	396	$\geq 14\%$	$\geq 1,10$
S275	313	452		
S355	391	505		
S420	463	559		
S460	490	560		

7.3 Slagseghetsprovning

För slagseghetsprovning ska provstycken tas ut och provningarna utföras enligt rekommendationer i relevant produktstandard.

Normalt utförs slagseghetsprovning enligt SS-EN ISO 148-1.

Acceptanskriterierna är de samma som för nytt stål enligt relevant produktstandard.

Om acceptanskriterierna inte uppfylls vid en provningstemperatur under 20°C är det säkert att anta seghetsklass JR eftersom samtliga konstruktionsstål tillverkade efter 1946 uppfyller nu gällande seghetskrav vid rumstemperatur.

7.4 Kemisk sammansättning

För provning av kemisk sammansättning ska lämpliga metoder väljas bland dem som anges i SIS-CEN/TR 10261:2018

Samtliga legeringsämnen för vilka krav ställs i den relevanta produktstandarderna ska beaktas.

Dessutom ska kolekvivalenten bestämmas.

Acceptanskriterierna och metoden för att bestämma kolekvivalenten är de samma som för nytt stål enligt relevant produktstandard.

8 Referenser

- [1] C. Maraveas och Z. Fasoulakis, "Post-fire mechanical properties of structural steel," 8th Greek National Steel Structures Conference, 2014.
- [2] Z. Tao, X.-Q. Wang och B. Uy, "Stress-Strain Curves of Structural and Reinforcing Steels after Exposure to Elevated Temperatures," *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE / September 2013.
- [3] "The American Institute of Steel Construction," [Online]. Available: <https://www.aisc.org/steel-solutions-center/engineering-faqs/11.2.-steel-exposed-to-fire/#9366>. [Använd 27 maj 2020].
- [4] R. Tide, "Integrity of Structural Steel After Exposure to Fire" .AISC, *Engineering Journal*, First Quarter, 1998, pp.26-38.
- [5] S. S. Shapiro och M. B. Wilk, "An analysis of variance test for normality (complete samples)," *Biometrika*, vol. 52, 1965.
- [6] J.-M. Schneider, M. Bigerelle och A. Iost, "Statistical analysis of the Vickers hardness," *Materials Science and Engineering*, vol. A262, 1999.

Bilaga B

-

Utlåtande

Kontaktperson RISE

Tom Lindström
Material och produktion
+46 10 516 53 50
tom.lindstrom@ri.se

Datum

2022-01-20

Beteckning

O100480.DP17-160557

Sida

1 (2)

Skanska Sverige AB
Strandbergsgatan 8
112 51 STOCKHOLM

Utlåtande om metod för återbruk av stål i bärande konstruktioner

Uppdragsgivare

Skanska Sverige AB

Uppdrag

RISE har på uppdrag av Skanska Sverige AB granskat och utvärderat:

Handbok MVR BS04:2021 Återbruk av stål i bärande konstruktioner [1],

samt:

Bakgrundsdokument till procedur för bedömning av egenskaper hos återbrukat konstruktionsstål enligt MVR BS04:2021 [2].

Granskningen omfattar överensstämmelse med och uppfyllande av relevanta standarder inom stålbyggnadsteknik, främst:

- EKS Boverkets konstruktionsregler
- SS-EN 1993 Eurokod 3: Dimensionering av stålkonstruktioner
- SS-EN 1090-1 Utförande av stål- och aluminiumkonstruktioner – Del 1: Bedömning av bärverksdelars överensstämmelse med ställda krav
- SS-EN 1090-2 Utförande av stål- och aluminiumkonstruktioner – Del 2: Stålkonstruktioner
- AMA HUS Svensk Byggtjänsts referensverk för upphandlingsunderlag och tekniska beskrivningar för husbyggnadsarbeten

men även med mer generella standarder för livslängdsplanering och hållbarhet av byggnadsverk:

- SS-ISO 15686 Byggnader och byggnadsverk – Livslängdsplanering
- SS-ISO 15392 Hållbarhet hos byggnadsverk – Allmänna principer
- SS-ISO 20887 Hållbarhet hos byggnadsverk – Utformning för demontering och anpassningsförmåga – Principer, krav och vägledning

RISE Research Institutes of Sweden AB

Postadress
Box 857
501 15 BORÅSBesöksadress
Brinellgatan 4
504 62 BoråsTfn / Fax / E-post
010-516 50 00
033-13 55 02
info@ri.se

Detta dokument får endast återges i sin helhet, om inte RISE Research Institutes of Sweden AB i förväg skriftligen godkänt annat.

Utlåtande

Handboken [1] ger information, råd och vägledning om återbruk av stål i bärande konstruktioner. Innehållet i [1] bedöms vara väl grundat i relevanta standarder inom stålbyggnadsteknik såsom EKS, SS-EN 1993, SS-EN 1090-1, SS-EN 1090-2 och AMA HUS. Vid granskningen har inte hittats något i det bedömda materialet [1] som strider emot ovan refererade standarder. Metodiken för återbruk av stål som beskrivs i [1] bedöms vara fullt applicerbar enligt generella standarder för livslängdsplanering och hållbarhet av byggnadsverk såsom SS-ISO 15686, SS-ISO 15392, SS-ISO 20887.

Bakgrundsdokumentet till procedur [2] är grunden till en företagsspecifik procedur för bedömning av återbrukat stål enligt procedur B i [1]. [2] ger en sammanfattning av innehållet samt exempel på praktisk tillämpning av informationen i [1]. I [2] rekommenderas att profilen med den minsta genomsnittliga hårdheten anses som representativ för ett kontrollparti och används till förstörande provningar. Detta är ett avsteg på säker sida från rekommendationerna i [1]. Proceduren och de praktiska tillämpningarna i [2], med avsteg enligt ovan, bedöms vara väl grundat i [1] och därmed inte strida emot relevanta standarder inom stålbyggnadsteknik, livslängdsplanering- och hållbarhet av byggnadsverk

Referenser

- [1] Handbok MVR BS04:2021 Återbruk av stål i bärande konstruktioner
- [2] Bakgrundsdokument till procedur för bedömning av egenskaper hos återbrukat konstruktionsstål enligt MVR BS04:2021

RISE Research Institutes of Sweden AB **Kemi och tillämpad mekanik - Bygg och infrastruktur**

Utfört av

Granskat av

Tom Lindström

Ola Widlund

Bilaga C

-

Exempel på provningsintyg

**Provningsintyg för återbrukade profiler
Enligt MVR BS04:2021
2021-10-21**

1 Sammanfattning

Detta dokument är ett provningsintyg enligt branschstandarden MVR BS04:2021 för återbrukade profiler där följande egenskaper bedöms:

- Sträck- och brottgräns
- Brottförlängning
- Tvärsnittsdimensioner
- Slagseghet
- Kemisk sammansättning och kolekvivalent

Profilerna motsvarar HEM120 i S235JR enligt EN 10025-2 med avseende på dessa egenskaper.

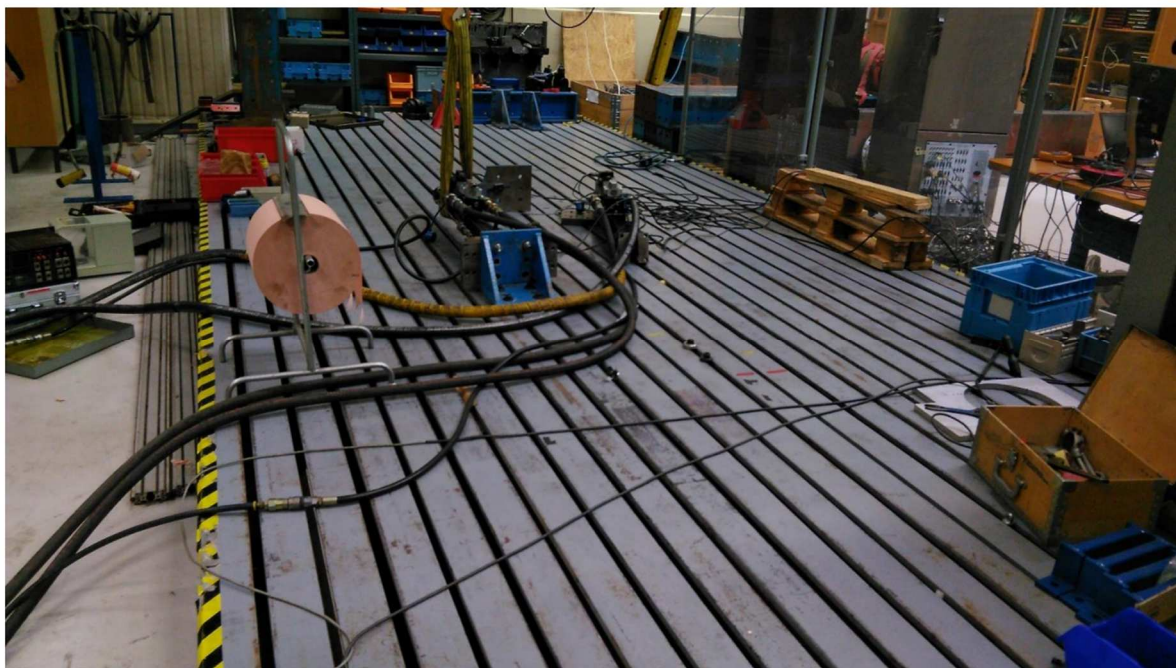
Visuell inspektion, kontroll av dimensioner samt oförstörande provning utfördes av Christopher Muhl, Stena Stål, och Wylliam Husson, ProDevelopment, den 30 juni 2021 på Stena Stål:s filial i Sävenäs.

Förstörande provningar utfördes av RISE, se respektive provningsrapport.

Wylliam Husson, ProDevelopment, ansvarade för analys och rapportskrivning.

2 Ursprung, visuell inspektion och spårbarhet

Profilerna har tidigare använts som testbord hos Testitute AB på Aröds Industriväg 64, 422 43 Hisings Backa. De installerades på 1990-talet.



Figur 2-1 Profilerna som testbord

Profilerna har känt ursprung och är tillverkade efter 1971. Därför tillämpas procedur B i MVR BS04:2021.

Profilerna har enskilda beteckningar från M1 till M33 och är markerade med märkpena på överflänsen i båda ändar.

Profilerna visar inga tecken på plasticering eller brandpåverkan. De är målade med ljus grå färg och lite ytrost finns.



Figur 2-2 Profilerna

Profil M32 har ett antal skruvhål med diameter 18 mm, se figur 2-3.



Figur 2-3 Skruvhål i profil M32

3 Dimensioner och toleranser

Tvårsnittsdimensioner har mätts i ena änden av varje balk med skjutmått med mät noggrannhet +/- 0,5 mm. Resultat anges i tabell 3-1.

Tabell 3-1 Tvårsnittsdimensioner

Balk	Flänstjocklek t_f [mm]	Livtjocklek t_w [mm]	Höjd b [mm]	Bredd b [mm]
M1	20,5	12,0	140,0	127,5
M2	21,0	12,0	139,5	127,5
M3	21,0	11,5	139,5	128,0
M4	21,0	12,0	140,0	128,0
M5	21,0	12,0	140,0	127,5
M6	20,5	12,0	139,0	127,0
M7	21,0	12,0	140,0	127,5
M8	21,0	12,0	140,0	-
M9	20,5	12,0	140,0	-
M10	20,5	12,0	139,5	128,5
M11	20,5	11,5	140,0	127,5
M12	21,0	11,5	139,5	128,0
M13	21,0	12,0	140,0	128,0
M14	21,0	12,0	139,0	127,5
M15	20,0	12,0	139,5	128,5
M16	21,0	12,0	139,0	128,0
M17	20,5	12,0	140,0	128,0
M18	21,0	12,0	140,0	128,5
M19	20,5	11,5	139,5	128,0
M20	20,5	12,0	140,0	127,5
M21	21,0	12,0	139,5	128,0
M22	21,0	11,5	139,0	128,0
M23	21,0	12,0	139,5	-
M24	21,0	12,0	139,5	128,0
M25	21,0	12,5	139,5	127,5
M26	20,5	12,0	139,5	128,0
M27	21,0	12,0	139,5	127,0
M28	20,5	12,0	139,5	127,0
M29	21,0	11,5	140,0	128,0
M30	20,5	12,0	140,0	128,5
M31	21,0	12,0	139,5	-
M32	21,0	11,5	139,5	128,0
M33	20,5	12,0	139,5	128,5

Tvårsnittsdimensionerna motsvarar en HEM120 profil enligt EN 10034, se tabell 3-2

Tabell 3-2 Tvårsnittsdimensioner för HEM120

	Flänstjocklek t_f [mm]	Livtjocklek t_w [mm]	Höjd b [mm]	Bredd b [mm]
Nom.	21,0	12,5	140,0	126,0
Min.	19,0	11,0	138,0	124,0
Max.	23,5	14,0	143,0	130,0

4 Oförstörande hårdhetsprovning

Hårdhetsprovning genomfördes med en UCI hårdhetsmätare av modell NewSonic SonoDur 3 med tryckkraft HV10.

Hårdhetsmätaren kontrollerades initialt mot en kalibrerad platta med hårdhet 157,1 HV10. Genomsnittet avvek med mindre än 5 HV och resultatens spridning var ca. 2%, se tabell 4-1.

Tabell 4-1 Resultat av initial kontroll mot kalibrerad platta

Mätning	1	2	3	4	5
Hårdhet (HV10)	157,4	150,9	160,7	150,8	158,1
Mätning	6	7	8	9	10
Hårdhet (HV10)	157,6	160,7	156,0	155,3	154,8
Genomsnitt	156,9				
Standardavvikelse	2,9 (1,9%)				

Varje balk provades på en fläns vid ena änden, 1/6 av profilbredden från flänskanten. Ytan slipades med vinkelslip i två steg, först med kornstorlek 60 och slutligen med kornstorlek 120.

En balks hårdhet tas som genomsnittet av 5 konsekutiva mätningar i samma punkt.

Temperaturen mättes med en IR-termometer och varierade mellan 20,4 och 39,0°C.

Resultaten anges i tabell 4-2.

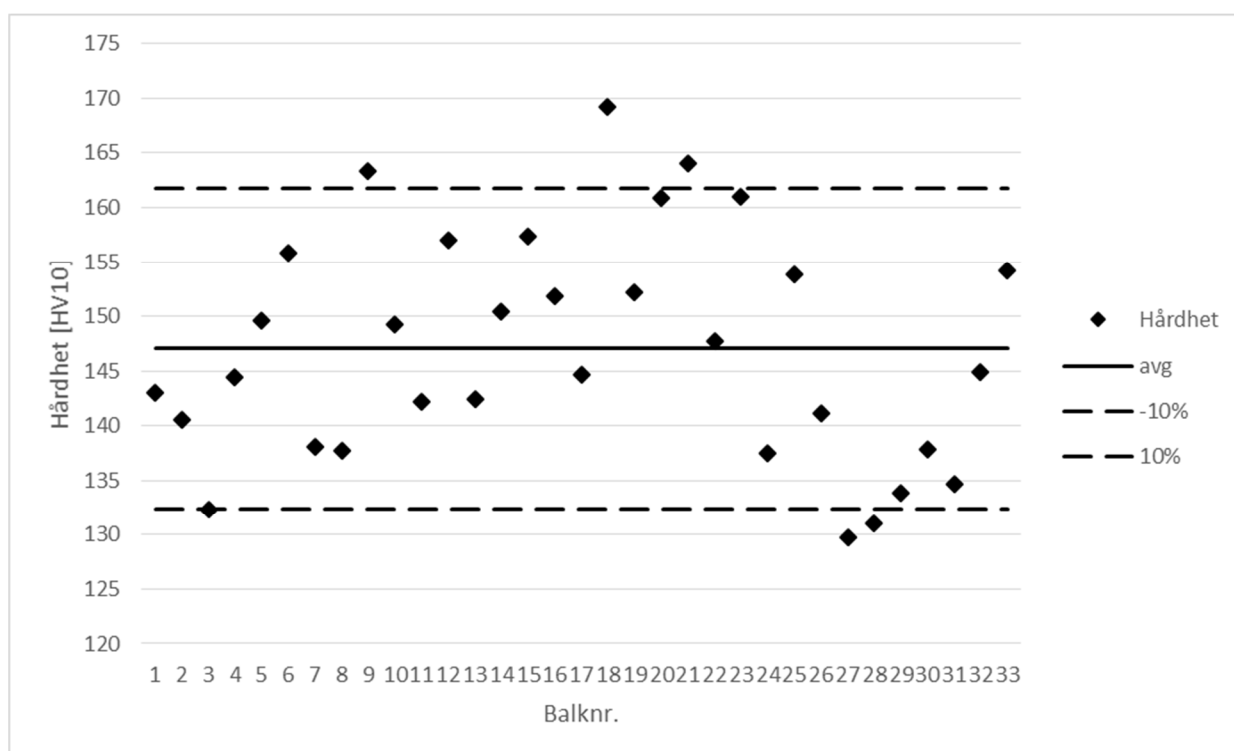
Tabell 4-2 Resultat av hårdhetsmätningar

Balk	Mätning					Genomsnitt
	1	2	3	4	5	
M1	140,8	151,9	143,5	140,0	138,6	143,0
M2	128,0	138,0	139,3	153,6	144,0	140,6
M3	133,0	138,3	131,1	130,5	128,5	132,3
M4	146,0	153,9	127,3	153,7	141,3	144,4
M5	147,2	161,8	135,8	150,7	152,4	149,6
M6	160,9	151,2	148,2	167,3	151,6	155,8
M7	135,6	137,3	141,5	138,1	138,1	138,1
M8	145,1	131,9	130,0	141,2	140,3	137,7
M9	173,7	170,0	151,2	162,1	159,4	163,3
M10	138,1	151,6	147,3	145,0	164,6	149,3
M11	142,5	142,7	125,8	141,0	158,8	142,2
M12	163,4	147,3	151,1	154,3	168,7	157,0
M13	132,8	135,2	147,8	152,3	144,2	142,4
M14	139,6	169,8	151,1	144,6	146,0	150,4
M15	157,5	170,3	161,6	151,3	146,3	157,4
M16	151,1	161,4	167,8	144,1	134,9	151,8
M17	135,1	167,3	139,2	137,8	143,9	144,7
M18	156,2	175,9	154,3	187,9	171,7	169,2
M19	159,5	155,5	150,2	138,3	157,3	152,2
M20	154,8	154,5	174,7	143,9	176,8	160,9
M21	178,8	165,7	160,8	171,0	143,8	164,0
M22	159,0	141,7	136,4	159,4	142,0	147,7
M23	162,0	170,4	148,3	163,0	161,1	161,0

M24	139,9	135,5	145,1	137,2	129,8	137,5
M25	151,5	156,6	150,1	160,6	150,2	153,8
M26	137,1	144,0	142,2	137,5	145,4	141,2
M27	122,4	129,9	131,9	131,0	133,1	129,7
M28	131,7	127,9	126,8	133,8	134,7	131,0
M29	142,0	135,0	133,1	118,3	141,0	133,9
M30	141,8	146,1	138,0	125,7	137,3	137,8
M31	128,6	132,7	127,9	137,5	147,0	134,7
M32	146,1	142,5	140,7	147,3	147,7	144,9
M33	153,6	148,5	154,0	151,3	163,7	154,2

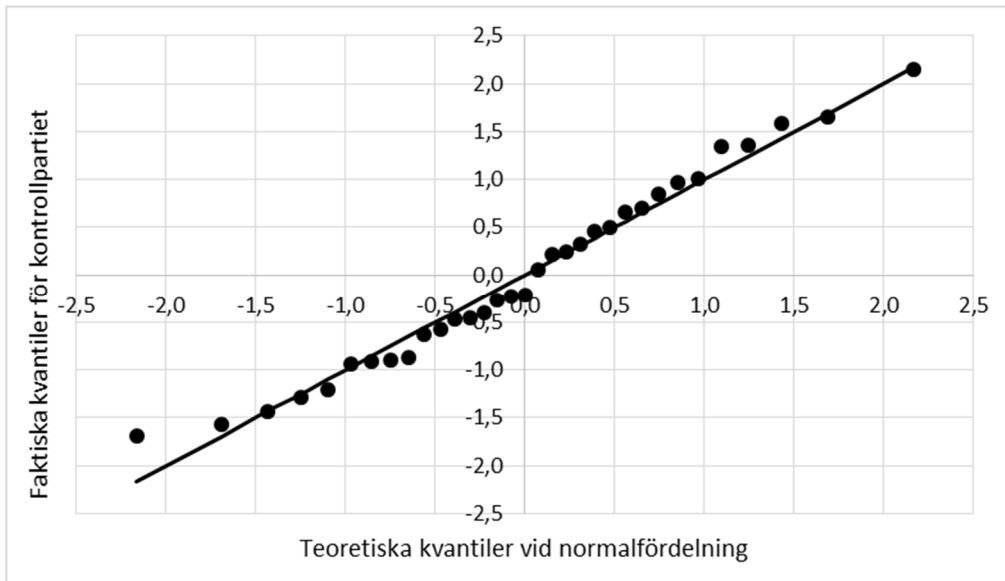
Den genomsnittliga hårdheten är 147,1 HV10 med en standardavvikelse på ca 7%.

Figur 4-1 visar samtliga balkars hårdhet (genomsnitt av 5 mätningar) samt genomsnittet och avvikelser på -10 respektive +10%. Totalt fem balkar avviker med mer än 10% från genomsnittet.



Figur 4-1 Grafisk framställning av resultaten

Att några balkar visar relativt stora avvikelser kan bero på kontrollpartiets storlek. När resultaten analyseras med ett QQ-diagram, se figur 4-2, bildar punkterna en diagonal vilket betyder att mätvärdena är normalfördelade och kontrollpartiet är homogent.



Figur 4-2 Q-Q diagram

Kontrollpartiet bedöms vara homogent med en genomsnittlig hårdhet motsvarande en brottgräns på 471 MPa som uppfyller kriterier för S275.

5 Förstörande provning

Förstörande provning utfördes på en bit av balk M33.

5.1 Drag- och slagseghetsprovning

Drag- och slagseghetsprovning enligt SS-EN ISO 6892-1B:2019 respektive SS-EN ISO 148-1:2016 utfördes av RISE och redovisas i rapport O100480.DP04-160550.

Övre sträckgräns, $R_{eH} = 296 \text{ N/mm}^2 \geq 267 \text{ N/mm}^2$ (S235)
Brottgräns, $R_m = 442 \text{ N/mm}^2 \geq 396 \text{ N/mm}^2$ (S235) och $R_m \geq 1,1 R_{eH}$
Brottförlängning, $A = 32,0 \% \geq 14 \%$

Materialet uppfyller acceptanskriterierna för S235.

Slagseghet KV_2 300 J vid -20°C , medelvärde: $8,3 \text{ J} < 20 \text{ J}$! (J2)
(9,0/7,0/9,0)

Materialet uppfyller inte acceptanskriterierna för seghetsklass J2.

Det kan antas på säkra sidan att materialet har seghetsklass JR.

5.2 Kemisk sammansättning

Kemisk sammansättning fastställdes av RISE och redovisas i rapport O100152-160550-1.

I tabell 5-1 jämförs resultaten från analysen med acceptanskriterier för produktanalys (tjocklek $> 16 \text{ mm}$) i S235JR enligt EN 10025-2.

Tabell 5-1 Resultat av kemisk analys samt acceptanskriterier enligt EN 10025-2.

Ämne	C	Mn	P	S	Cu	Cr	Mo	V	Ni
Vikt-%	0,152	0,65	0,022	0,014	0,16	0,054	$<0,01$	$<0,01$	0,065
Krav	$\leq 0,19$	$\leq 1,50$	$\leq 0,045$	$\leq 0,045$	$\leq 0,60$	-	-	-	-

$$CEV = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15} = 0,29\%$$

Kolekvivalenten enligt ekvationen ovan uppfyller kravet i EN 10025-2 för nominell godstjocklek upp till 30 mm och stål S235JR.