

Hållfasthetsvariationer i bandände hos varmvalsade höghållfasta stål

Variation in mechanical properties of the strip
end for hot rolled high strength steel

LINUS BENGTSSON

2005

EXAMENSARBETE
Bearbetningsteknik
Nr: E 3143 MT



HÖGSKOLAN
Dalarna

EXAMENSARBETE, D-nivå

Bearbetningsteknik

Program	Reg nr	Omfattning
Materialteknik, 180 p	E 3143 MT	20 p
Namn	Datum	
Linus Bengtsson	2005-03-10	
Handledare	Examinator	
Mohammed Tahir	Lars Hansson	
Företag/Institution	Kontaktperson vid företaget/institutionen	
SSAB Tunnpå AB	Per Tägtström	
Titel		
Hållfasthetsvariationer i bandände hos varmvalsade höghållfasta stål		
Nyckelord		
Varmvalsning, Utskiljningshärdning, Mikrolegeringar, Hasplingstemperatur, Svalningshastighet, HSLA-stål, Formatplåt		

Sammanfattning

Varmvalsade HSLA-stål uppvisar normalt en lägre hållfasthet i sista änden av bandet. Arbetsmaterialet som används i examensarbetet är ett extra höghållfast kallformningsstål, Domex 700MC. Syftet med arbetet var att undersöka utbredningen av den lägre hållfastheten från bandänden och inåt i bandet samt att genom värmebehandling utreda hur proverna påverkas av anlöpning. Utifrån dessa resultat samt processdata skulle eventuella kopplingar till tillverkningsfaktorer bestämmas.

Utbredningen bestämdes genom att undersöka hållfastheten hos 9 band, med olika tjocklek genom dragprov tagna i både längs- och tvärsriktning. Anlöpningen genomfördes i det temperaturområde som banden hasplas, 560 °C, 600 °C och 640 °C. Ändeffektens troligaste orsaker beskrev och lösningsförslagen presenterades.

Resultaten visar att ändeffekten generellt sträcker sig runt 60 meter in i bandet från sista änden. De individuella skillnaderna mellan banden är stor och varierar mellan 20 och 90 meter, troligtvis på grund av skillnader i svalningshastigheten hos de yttre varven på rullen. Banden har hasplats i två olika hasplar vilket inte tycks ha någon större inverkan på hållfastheten. Hållfastheten på tvärsproverna är generellt sett större än för längsproverna vilket är en effekt av deformationsskillnader i valsningprocessen. Effekterna av anlöpningen blev att de prov som hade den lägsta hållfastheten i oanlöst tillstånd erhöll den största ökningen på brottgränsen. Ändeffektens längd minskade kraftigt redan vid anlöpning i 600 °C. Vid den högsta anlöpningstemperaturen finns inga resultat som tyder på att ändeffekten finns kvar.



Dalarna
University College

DEGREE PROJECT

Metals working Engineering

Programme	Reg number	Extent
Materials engineering	E 3143 MT	30 ECTS
Name of student	Year-Month-Day	
Linus Bengtsson	2005-03-10	
Supervisor	Examiner	
Mohammed Tahir	Lars Hansson	
Company/Department	Supervisor at the Company/Department	
SSAB Tunnpå AB	Per Tägtström	
Title		
Variation in mechanical properties of the strip end for hot rolled high strength steel		
Keywords		
Hot rolling, Coil temperature, Precipitation, Microalloyed steel, HSLA steel, Thermomechanical rolling		

Summary

Hot rolled HSLA-steel (high strength low alloy), normally show a lower strength in strip ends. Working material in this degree project were a high strength cold forming steel, Domex 700MC. The purpose were to examine the range of this end effect from the strip end and inwards. Furthermore, the samples should be re-heated in order to investigate how the end effect is affected by an annealing. On basis of these result and process data, possible manufactory factors should be determined.

The range of this end effect was determined for nine strips with different thickness, both in and across the rolling direction, at positions from 3 to 80 m from strip end and in the middle of the strip. Samples were re-heated at 560 °C, 600 °C and 640 °C, i.e. in the same temperature range as the strips were coiled. The most possible cause of end effect and solution proposal were suggested.

The results show that the end effect generally ranges to approximately 60 m from the strip end. However, the effect ranges between 20 and 90 m for individual strips, most likely due to variations in cooling rate for the outer layers of the coil.

The strips were coiled in two different coilers. This did not seem to have any significant effect of the strength of the materials.

In general, the tensile strength is higher across the rolling direction. This is explained by a difference in deformation during the hot rolling process.

The annealing operations resulted in an increased yield strength for the samples with the lowest strength in the as-coiled condition. The range of the end effect was radically reduced already at 600 °C. At the highest annealing temperature, there were no sign of a strip end yield strength drop at all.

Förord

Detta examensarbete är utfört på SSAB Tunnpååt i Borlänge mellan 2004-09-20 och 2005-03-10.

Jag skulle vilja tack min handledare på företaget Per Tägtström, handledare på högskolan Mohammed Tahir samt min examiner Lars Hansson. Dessutom skulle jag vilja tacka övrig personal på avdelningen VZT, SSAB Tunnpååt. Jag skulle även vilja tacka Arne Wikström för hjälp med klippning av prover.

Ett stort tack till Nils Hörnström och Jonas Klang som under sommaren 2004 har genomfört provning och värmebehandling vars resultat använts i denna rapport.

Innehållsförteckning

1 INTRODUKTION	1
2 PROCESSBESKRIVNING	2
2.1 VARMVALSVERKET, SSAB TUNNPLÅT AB BORLÄNGE	2
2.2 ARBETSMATERIALET	3
3 TEORI	4
3.1 MIKROLEGERINGAR	4
3.2 HÄRDNINGSEFFEKTER	4
3.2.1 Utskiljningshärdning	5
3.2.2 Korngränshärdning	6
3.2.3 Lösningshärdning	7
3.3 ÖVRIGA PÅVERKANDE PARAMETRAR PÅ HÅLLFASTHETEN	8
3.3.1 Skenmärken	8
3.3.2 Kantdropp	8
4 TIDIGARE STUDIER	9
4.1 HÅLLFASTHETSvariationer i bandände	9
4.2 SVALNINGSFÖRLOPPET EFTER HASPLING	10
5 UTFÖRANDE	11
5.1 ÄNDEFFEKT PROVNING	11
5.2 SKENMÄRKEN	12
5.3 MÄTNING AV TEMPERATUR EFTER KYLSTRÄCKAN, HASPLINGSTEMPERATUR	13
5.4 JÄMFÖRELSE MELLAN PROVER MED OCH UTAN FLYTOMRÅDE	13
6 RESULTAT	15
6.1 HÅLLFASTHETSavvikelse längs bandlängden	15
6.1.1 Hållfasthet hos längsprover, haspelvis	16
6.2 HÅLLFASTHETSavvikelse tvärs bandlängden	17
6.2.1 Hållfasthet hos tvärsprover, haspelvis	18
6.3 FÖRPARSTEMPERATUR	20
6.4 SKENMÄRKEN	22
6.5 HASPLINGSTEMPERATUR	23
6.6 ANLÖPNINGSEFFEKT	24
6.7 JÄMFÖRELSER MELLAN LÄNGS- OCH TVÄRS-PROVER	28
6.8 SKILLNADER I HÅLLFASTHET ÖVER BANDBREDDEN	29
7 DISKUSSION	30
8 SLUTSATSER	33
9 FORTSATT ARBETE	34
10 REFERENSER	35

11 BILAGOR

11.1 BILAGA 1 SAMTLIGA HÅLLFASTHETSRESULTAT FÖR OANLÖPTA PROVER

11.2 BILAGA 2 SPRIDNING PÅ OBEHANDLADE PROV, HASPELVIS

11.3 BILAGA 3 KURVANPASSNING

1 Introduktion

Varmvalsade HSLA-stål (high strength low alloy) uppvisar normalt en lägre hållfasthet i sista änden av bandet. Denna s.k. ändeffekt har länge varit känd och flera undersökningar [1,2] har genomförts för att utvärdera utbredningen av den lägre hållfastheten. En studie [1] visar att de troligaste orsakerna till att bandänden har låg hållfasthet är det att den svalnar för snabbt efter hasplingen eller att mikrolegeringselementen har skiljts ut redan i austeniten på grund av att änden är kallare genom färdigverket. Utbredningen av ändeffekten påverkas av hur lång yttre varvet på rullen är, det vill säga hur stor rullen är efter haspling. En annan studie [2] visade att banden hade kraftigt ändeffekt som sträckte sig upp till 8 meter in i rullen. Ändeffekten har enligt dessa studier bildats efter coilbox, antingen i färdigsträckan, kylsträckan eller i haspeln.

Materialet som undersökts i detta examensarbete är Domex 700MC. DX 700MC är ett extra höghållfast kallformningsstål och dess typiska egenskaper är:

- Utmärkt formbarhet i förhållande till sin höga hållfasthet.
- God svetsbarhet
- God slagseghet vid låg temperatur

Materialet är varmvalsat och har en minsta övre sträckgräns längs valsriktningen på 700 MPa.

Problemformulering och syfte

- Bestämma ändeffektens utbredning med hjälp av hållfasthetsprovning
- Litteraturstudie om materialmekanismer som påverkar ändeffekten
- Påverkan av värmebehandling
- Inverkande tillverkningsfaktorer

Examensarbetet är avgränsat till ett material med samma ämnesspecifikation, ÄS, vilket betyder att legeringshalterna i materialet är lika. Dessutom undersöks två olika tjocklekar av färdiga band. Försöken är utförda genom vanlig dragprovning både längsvalsriktningen och tvärs. Dessutom har vissa prov värmebehandlats för att undersöka om en otillräcklig utskiljningshärdning är anledningen till att hållfastheten sjunker vid bandänden. Värmebehandlingen har genomförts i temperaturer runt den aktuella hasplingstemperaturen för materialet.

Resultaten visar att en generell utsträckning av den lägre hållfastheten på runt 60 meter in i bandet från den sista änden. Däremot är variationer mellan de olika undersökta banden stor, mellan 20 till 90 meter in i bandet. Den troligaste orsaken till de stora variationerna i hållfasthet är olika svalningshastigheter efter hasplingen.

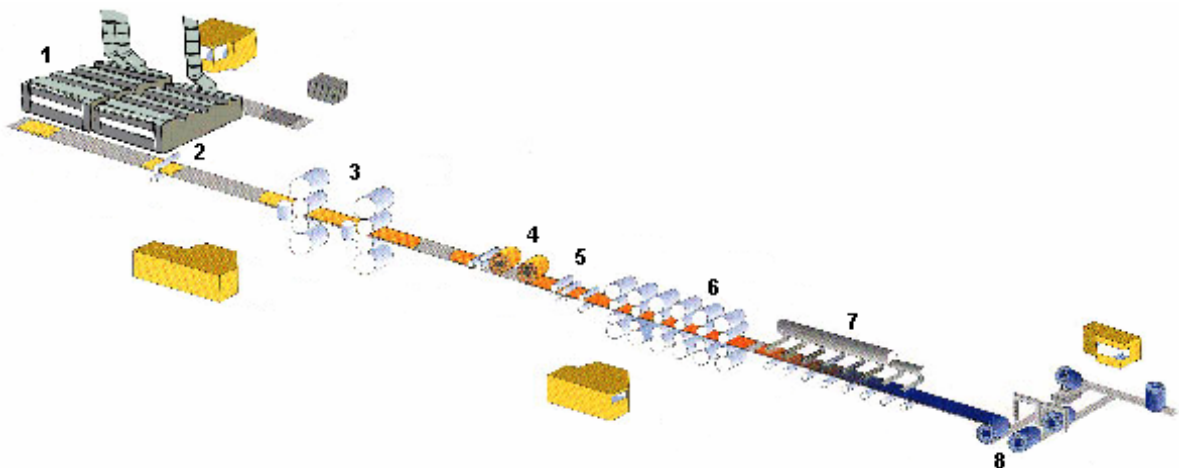
Anlöpningen av de olika proverna har resulterat i att de prover med en låg hållfasthet i oanlöp tillstånd erhållit den högsta ökningen av hållfastheten, det vill säga de första 10 metrarna för alla de undersökta banden samt vissa band med en lägre hållfasthet längre in i bandet. Ändeffektens utbredning minskar markant vid anlöpning vid 600°C och försvinner vid den högsta anlöpningstemperaturen.

2 Processbeskrivning

Valsningen av Domex 700MC sker i varmvalsverket i Borlänge. Materialet som undersöks har sedan klippts till formatplåt i en av formatsträckorna där även prov har klippts. Processkedjan för varmvalsverket beskrivs nedan.

2.1 Varmvalsverket, SSAB Tunnbrå AB Borlänge

Varmvalsverket i Borlänge, Figur 1, valsar ämnen från 220 mm ner till 1,5-16 mm tjock plåt. Ämnena produceras och transporteras med tåg främst från Luleå men också från Oxelösund. Ämnens dimension varierar mellan 650-1650 mm i bredd och 3,6 –11,1 m i längd. Värmningen av ämnen sker i två separata stegbalksugnar, se 1 i Figur 1. Den ena är gasoeldad och den andra eldas med olja. Beroende på ämnets kemiska analys samt slutlig kvalitet på bandet värms det i olika tider till olika temperaturer. Temperaturen påverkar bland annat ämnets bearbetbarhet, upplösning av partiklar och segringar från gjutningen. För att erhålla upplösning av partiklar värms ämnena i olika tider och till olika temperaturer beroende av diffusionskinetiken i materialet.



Figur 1 Principiell skiss över varmvalsverket Borlänge

Vid uppvärmningen bildas glödskalet (oxider) på ytan av ämnet. Glödskalet avlägsnas i en så kallad sprutbox, 2 i Figur 1, där ämnet utsätts för högtrycksspolning av vatten. Oxiden måste avlägsnas för att inte valsas in i materialet i förparet då detta skulle medföra en negativ effekt på materialets egenskaper samt skada bandets ytfinhet.

Den största reduktionen av ämnets tjocklek görs i förparet, 3 i Figur 1. SSAB Tunnbrå har ett reversibelt universalsvalsverk vilket betyder att valsningen sker både vertikalt, av ett duopar, och horisontellt, av ett kvartopar. Ämnena valsas 5 eller 7 stic ner till en tjocklek på cirka 20-45 mm. Glödskalet som bildats under förparsvalsningen spolats bort mellan vartannat stic.

För att kunna valsa långa band så används en coilbox, 4 i Figur 1. Hetan träds in i coilboxen och rullas upp. Avträdningen sker sedan omvänt att sista änden in i coilboxen blir första ände in i färdigsträckan. En annan fördel förutom möjlighet till att öka ringvikter är att temperaturprofilen i bandet blir jämnare. Skillnaden i temperatur mellan sista och första ände av bandet och skenmärken efter coilbox jämnas ut. Efter coilbox

passerar hetan en trumsax, 5 i Figur 1. Saxen används för att klippa bort ändarna på bandet för att få raka ändrar in i färdigsträckan. Glödskal som tillväxt efter förparet och i coilboxen sprutas bort innan färdigvalsningen.

I det kontinuerliga färdigverket, 6 i Figur 1, sker valsningen till slutlig produktdimension. Tjocklekar som är möjliga att producera är mellan 1,5 och 16 mm. Paren i färdigsträckan är av kvartotyp vilket betyder att varje par har två arbetsvalsar och två stödvalsar. Kylsträckans, 7 i Figur 1, funktion är att ge materialet rätt materialegenskaper. Kylningen sker med vatten genom ett antal duschar från både över och undersida med en vattenkapacitet på max 4000 m³/h för vardera sida. Materialet hasplas sedan upp i en av de två hasplarna, 8 i Figur 1, skjuts av och transporteras till ett lager med hjälp av transportband och truck. Under transporten sker luftsvälning av bandet.

2.2 Arbetsmaterialet

Arbetsmaterialet som undersökts i detta examensarbete är Domex 700MC (MC är förkortningen för Thermo Mechanical rolled, special Cold forming). DX 700MC är ett extra höghållfast kallformningsstål och dess typiska egenskaper är:

- Utmärkt formbarhet i förhållande till sin höga hållfasthet.
- God svetsbarhet
- God slagseghet vid låg temperatur

Extra höghållfasta material av Domex 700MC sort används i applikationer som kräver en hög sträckgräns av säkerhets- och hållfasthetsmässiga problem. Fördelarna är att mindre godstjocklekar krävs för att uppnå en lika hög hållfasthet jämfört med vanliga kolstål varav vikten på detaljerna minskas. Domex 700 MC används framförallt av fordonsindustrin och kranar. Genom att vikten på detaljerna kan minskas kan även bränsleförbrukningen på fordonen minska. Materialet är varmvalsat och har en minsta övre sträckgräns längs valsriktningen på 700 MPa. Riktvärdena för legeringselementen visas i Tabell 1.

Tabell 1 Riktvärden och maxvärden av legeringsämnen för Domex 700MC

C	Si	Mn	P (max)	S (max)	Al	Nb	V (max)	Ti
0,060	0,050	1,850	0,025	0,004	0,025	0,06	0,20	0,110

De låga svavel och kolhalterna i stålet gör att materialet kan klara snäva bockningsradier i kallt tillstånd.

3 Teori

Mikrolegeringar som används i Domex 700MC är starka karbid- och nitridbildare. Dessa partiklar bildar starka hinder i materialet för deformation och korntillväxt. Legeringarna tillsätts i stålframställningen och har vid gjutningen redan bildat starka partiklar. Dessa partiklar upplöses, förutom starka Ti-utskiljningar, i stegbalksugnarna och skiljs återigen ut när temperaturen på materialet sjunker under valsningsprocessen och i kylsträckan. Även andra legeringar tillsätts i materialet för att bland annat sänka omvandlingstemperaturen från austenit till ferrit.

3.1 Mikrolegeringar

Mikrolegeringar tillsätts material för att få små hårda utskiljningar som hindrar korngränser och dislokationers rörelse i materialet. Domex 700 har små tillsatser av Ti, Nb och V vilka skiljs ut som karbider, nitrider och karbonitrider vid olika temperaturer under tillverkningen av band. Partiklarna bildar hinder för korntillväxt i austenitområdet under valsningen vilket i sin tur leder till en mycket fin ferritisk struktur i det färdiga materialet.

De viktigaste partiklarna för partikelhärdningen skiljs ut under kylningen i kylsträckan, det vill säga fasomvandlingen från austenit till ferrit. Därefter tillväxer partiklarna vid luftsvälning i hasplat tillstånd. För att en lämplig utskiljningshärdning ska uppstå, d.v.s. rätt förhållande mellan storlek på partiklarna och det inbördes avstånden mellan partiklarna, krävs att legeringsämnen är jämt och fint fördelat i materialet. Diffusionsvägarna ska vara korta så att rätt storlek på partiklarna erhålls efter lämplig tid. Tabell 2 beskriver ingående mikrolegeringselementens funktion i DX700MC.

Tabell 2 Användning av mikrolegeringsämnen i TM (termomekanisk) behandlade stål

γ -kornförfining	TiN, NbC
Rekristallisationsbromsning	NbC, TiC
Utskiljningshärdning	NbC ^{α} , TiC ^{α} V(C,N) ^{α} , Ti(C,N) ^{α}
Sulfidformskontroll	Ti ₄ C ₂ S ₂

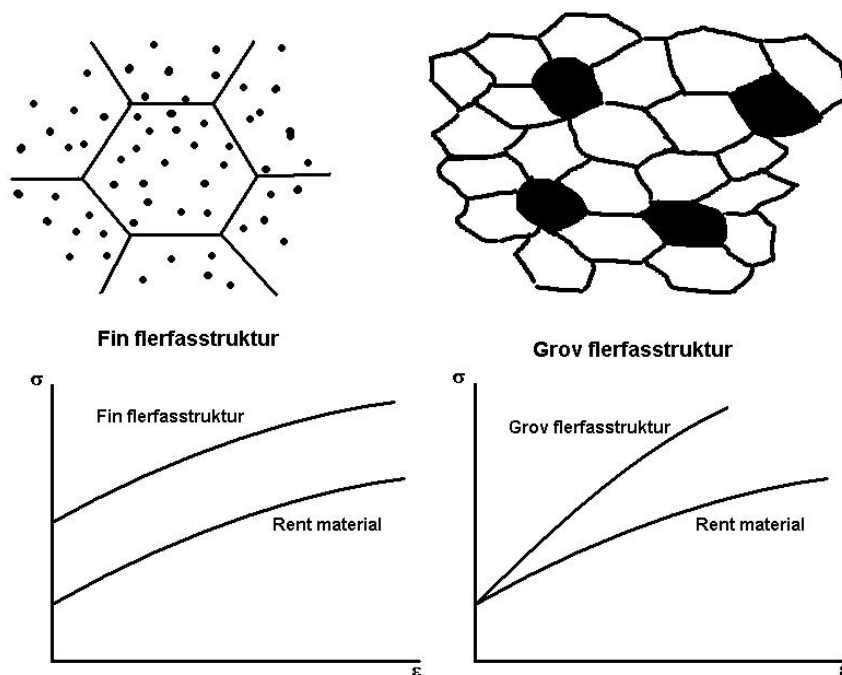
Utskiljningen av partiklar under kylningen i kylsträckan sker mycket snabbt genom en snabb löslighetssänkning av mikrolegeringsämnen i materialet. Ämnet kyls till ca 600°C i kylsträckan varvid kväve och kol diffunderar dels till redan bildade partiklar samt bildar nya partiklar med de inlösta mikrolegeringsämnen. Den snabba kylningen medför att partiklarna utskiljs findisperst.

3.2 Härdningseffekter

Legeringsämnen påverkar materialet på olika sätt under tillverkningen och färdigt band. I Domex 700MC är det framförallt utskiljningen av partiklar vid kylningen i kylsträckan och den efterföljande partikelutväxten vid luftsvälning som ger den extra hållfastheten i materialet jämfört med vanliga stål som ej är mikrolegerade. Härdningseffekterna som legeringsämnen ger upphov till beskrivs nedan.

3.2.1 Utskiljningshärdning

Motståndet mot plastisk deformation ökas mer eller mindre med en sekundär fas närvarande i materialet. Den hållfasthetsökning är starkt beroende av fördelningen av sekundärfasen där glest fördelade partiklar ger en mindre ökning än tätt fördelade. Beroende av hur partiklarna fördelas i materialet krävs olika mekanismer för hur plastisk deformation ska kunna ske. En tät partikelfördelning i materialet ger ett ökande motstånd mot enstaka dislokationers rörelse medan en gles ökar genereringen av nya dislokationer. I litteraturen [3] beskrivs de två olika mekanismerna genom utskiljningshärdning med, grov flerfasstruktur och fin flerfasstruktur, principen visas i Figur 2. I mikrolegerade stål erhålls vid tillverkningen en fin flerfasstruktur vilket betyder att partiklarna utövar en slags friktion mot enstaka dislokationers rörelse i materialet. Detta leder i sin tur en höjning i sträckgräns. Material med grov flerfasstruktur erhåller en ökad deformationshärdning som resultat av en mycket snabb dislokationsgenerering.



Figur 2 Skillnaden mellan fin och grov flerfasstruktur och dess påverkan på σ - ϵ -diagrammet

I varmvalsningsprocessen av DX 700MC erhålls den färdiga materialstrukturen direkt vid varmvalsningen utan vidare processer. Detta förfarande kräver bra styrning av processen.

Uppvärmningen av ämnena sker i stegbalksugnar, till mellan 1250-1270 °C. Enligt en undersökning [4], försvinner dendritiska Nb-rika, titaninnehållande, karbonitrider som bildats vid gjutningen och en ny kubiskt utskiljning formas utefter austenitkorngrensarna och inuti kornen. Andra studier visar även att ouplösta Ti-rika karbonitrider finns kvar efter uppvärmningen i Ti-Nb-stål medan inga karbonitrider finns kvar i stål Nb-stål [5]. Detta förklaras, enligt Irvine [6], med att upplösningstemperaturen i Nb-stålet är 1194 °C, vilket skulle betyda att 1250 °C är tillräckligt att lösa upp NbC och Nb (C,N). Däremot är inte niobet fullt lösligt i det titanlegerade stålet och kan fortfarande existera i Ti-rika

(Ti,Nb)(C,N) karbonitrider som formades under gjutningen. Dessa är väldigt stabila vid höga temperaturer och får en kubisk form.

Under den fortsatta processen, förparsvalsning och slutvalsning, sker utskiljning av Ti-Nb(C,N). Resultat från en studie [7], visar att fördelningen och storleken på Ti-utskiljningarna som ej löses upp under återuppvärmningen spela en viktig roll. Dels hindrar de korntillväxt av austeniten och dessutom påverkas utskiljningskinetiken av Nb under den fortsatta tillverkningen. Resultaten från undersökningen visar att Ti-utskiljningar fungerar som ympställen där kärnbildning av NbC under varmvalsning underlättas.

Den största utskiljningshårdande effekten erhålls av de karbider och nitrider som tillväxer och utskiljs inuti kornen i samband med kylningen i kylsträckan och hasplingen [8]. Temperaturen på bandet sjunker snabbt och därigenom även lösligheten hos mikrolegeringsämnen. Därför erhålls en finfördelad utskiljningsstruktur i materialet med partiklar både i korngränser och inuti kornen. Partiklarna tillväxer även efter hasplingen vilket resulterar i att utskiljningseffekten ökar. Maximal hållfasthetseffekt erhålles då rätt förhållande mellan partikelstorlek och det inbördes avståndet mellan dessa har uppnåtts [9]. Tillväxten av partiklar är beroende av diffusionskinetik, det vill säga temperaturberoende, där diffusionen av inlöst ämne till partiklar sker lättare vid högre temperatur. Det är därför väsentligt att hasplingstemperaturen är den önskvärda, cirka 600°C för det aktuella materialet. Är temperaturen för hög blir partiklarna färre och större vilket orsakar en minskad hållfasthet. I motsatt om temperaturen är för låg blir partiklarna för små och därigenom svaga hinder för dislokationsglidning. Partikeltillväxt kallas koalecens i litteraturen.

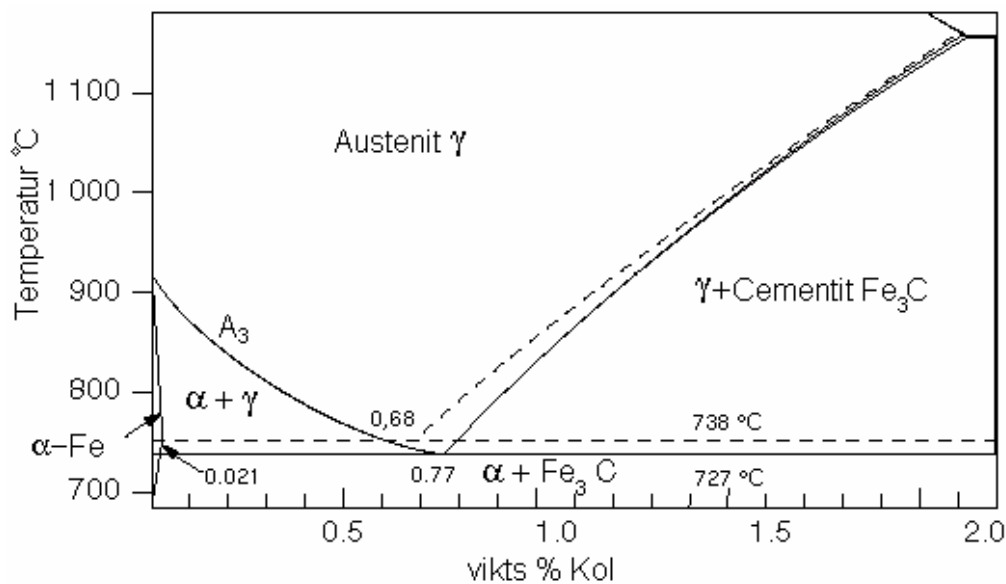
3.2.2 Korngränshårdning

Titantillsatts i Nb eller Nb-V mikrolegerade HSLA-stål hindrar korntillväxten hos austeniten under återuppvärmningen genom att forma stabila nitrider och karbider. Detta leder till en mycket finare ferritstruktur i det slutliga materialet och därigenom en högre slagseghet och sträckgräns [4].

Dislokationsrörelser hindras vid korngränser eftersom grannkornen har olika orienteringar i förhållande till varandra. För att deformationen ska fortgå från ett korn till ett annat måste stora spänningskoncentrationer uppstå i det deformerade kornet [10]. Detta förklarats med att det bildas dislokationståg mot korngränserna, så kallad "pile-up", vilket skapar stora spänningskoncentrationer och deformationen kan därigenom fortgå i materialet. Ju större korn desto fler dislokationer kan ingå i ett dislokationståg. Därigenom blir spänningskoncentrationen högre i ett stort korn och deformationen sker lättare in till det odeformerade kornet. En annan teori om kornstorlekens påverkan på hållfastheten har framlagts av Ashby. Han menade att dislokationsdensiteten i ett material kan delas upp i två olika populationer, statistiskt lagrade och geometriskt nödvändiga. De geometriskt nödvändiga är kornstorleksberoende och kompenserar för plastiska inkompatibiliteterna mellan olika korn medan de statistiskt lagrade är kornstorleksberoende [11]. Små korn resulterar i en snabbare dislokationsgenerering initialt av geometriskt nödvändiga dislokationer för att motverka kavitetbildning mellan korn. Således skapas fler hinder för de mobila dislokationers rörelse och därigenom en högre sträckgräns för material med en mindre kornstorlek.

Den uppbromsade kornstillväxten i austenit som beror på tidiga utskiljningar ökar sträckgränsen. Färdigvalsningen sker i ett icke-rekristalliserande tillstånd. Dessutom hindrar partiklar kornstillväxt vilket resulterar i en kraftig deformerad austenitisk struktur. Följden blir att ferriten har väldigt många gynnsamma kärnbildningsställen och den slutliga strukturen blir finkornig.

Manganhalten i DX700MC ger en positiv effekt till kornstorleken genom att A_3 temperaturen sänks (fasomvandlingstemperaturen) och möjliggör valsning i austenitområdet lägre ner i temperatur än vad annars skulle vara möjligt, se Figur 3. Därmed kan färdigvalsningen fortgå längre i austenitiskt tillstånd med en mer defektrik struktur som följd vilket möjliggör riklig kärnbildning och en finkornigare ferrit [12].



Figur 3 A_3 linjen i järn-koldiagrammet

En rapport [13] beskriver hur kornstorleksminskning i HSLA-stål kan ske effektivt genom kraftig deformation och kontrollerad kylning. Försöken utfördes efter en kraftig deformation, 80 % reduktion, av austeniten och kontrollerande kylningshastighet på 2-64 grader/s. Detta resulterade i en varierande kornstorleken från 9,55 till 1,06 μm där den lägsta kornstorleken erhöles vid snabb kylning. De ultrafina kornen kan uppstå dynamiskt genom töjningsinducerad rekristallisation om deformationen är tillräckligt kraftig. Kornstorleken minskar om kylhastigheten ökar, men ökar kylhastigheten till över 10 grader/s påverkas inte kornstorleken nämnvärt. Kommersiella TMCP-stål har en kornstorlek mellan 3-5 μm [14,15], medan andra rapporter beskriver en ferritkornstorlek som kan reduceras till 1-2 μm genom att använda en välkontrollerad valsningsprocess [16,17].

3.2.3 Lösningshärdning

Att legera med ett material som med stål bildar en fast lösning är ett vanligt sätt att öka hållfastheten [18]. Denna härdning kallas lösningshärdning. Grundorsaken till den högre hållfasthet som erhålls av inlösta ämnen är att växelverkan mellan inlösta atomerna och dislokationerna uppstår. Detta hindrar mobila dislokationers rörelse i materialet. Spännings- och töjningskurvan parallellförskjuts normalt uppåt, det vill säga att sträckgränsen och brottgränsen höjs medan deformationshärdningen ej påverkas av de inlösta atomerna. Normalt ökar sträckgränsen linjärt med mängden inlöst ämne.

En atom som lägger sig substitutionellt i gittret och har en annan storlek, än som i det här fallet järnatomen, åstadkommer ett töjningsfält i grundmassan. Lika så gäller för en atom som lägger sig interstitiellt och har en större storlek än hålrummet [19]. Denna effekt brukar kallas storlekseffekten vid elastisk växelverkan. En annan effekt är att de inlösta atomerna kan ha andra elastiska egenskaper vilket brukar kallas moduleffekten. Bägge dessa effekter höjer hållfastheten i materialet. Normalt sägs att inlösta atomer ger ett friktionsbidrag till flytspänningen.

3.3 Övriga påverkande parametrar på hållfastheten

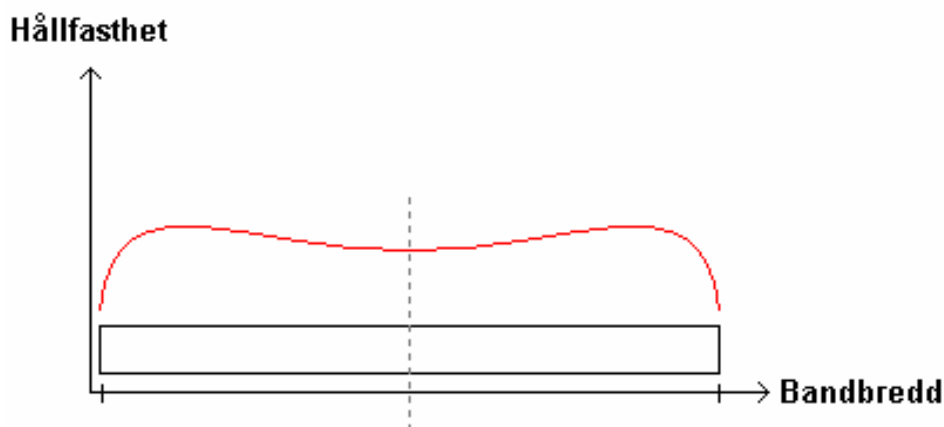
För att hållfastheten ska kunna utvärderas måste andra aspekter vägas in i resonemanget. Vissa prov kan ha lägre hållfasthet utan att det direkt beror på ändeffekten utan andra processberoende effekter från tillverkningen.

3.3.1 Skenmärken

Skenorna i ugnarna ger så kallade skenmärken på den färdiga rullen. Dessa uppkommer genom att skenorna, som är vattenkylda, kyler ämnena i ugnarna. Kylningen kan få som effekt att inte tillräcklig upplösning av utskiljningar från gjutningen. Bandet får då en lägre hållfasthet i dessa partier. Senare i valsningsprocessen blir temperaturen mer homogen i ämnet. För att kunna utvärdera ändeffekten måste dessa områden, med en lägre sluthållfasthet, försöka undvikas vid provtagningen. Uppvärmningstiden i ugnen spelar också en stor roll för att en tillräcklig upplösning ska erhållas. En längre tid ger en mer homogen temperatur i ämnet eftersom temperaturen då hinner påverka materialet i anslutning till skenorna. Legeringsämnena hinner vid längre tider mer eller mindre lösa upp sig.

3.3.2 Kantdropp

Var proven tas är en viktig parameter för att kunna utvärdera hållfastheten hos provena. Kanterna på ämnet är kallare än det övriga materialet vilket i sin tur leder till en lägre hållfasthet. Hållfasthetsprofilen tvärs bandet får en så kallad "badkarsprofil" [8], se Figur 4. Detta i sin tur påverkar provtagningen av bandet och det är därför viktigt var proven tas ut ur bandet. Uttag av prover från plåt är beskrivna i kap. 5.1.



Figur 4 Principiell skiss på variationen i hållfasthet över bandbredden

4 Tidigare studier

På SSAB Tunnbrå AB i Borlänge har två tidigare rapporter skrivits för att belysa problemet ändeffekter vid valsning av extra höghållfasta stål (EHS). Andra studier som specifikt beskriver ändeffekter hos HSLA-stål har ej funnits. Dessutom har en undersökning om simulering av kylhastigheten på varmvalsad hasplad EHS material genomförts.

4.1 Hållfasthetsvariationer i bandände

En av dessa undersökningar [1] är ett examensarbete som behandlar hållfasthet i bandändar hos DX700MC. Resultat från försöken visar att hur långt den lägre hållfastheten sträcker sig in i bandet inte skiljer sig direkt mellan tunna och tjocka band. Vidare visade det sig att korta rullar når snabbare en stabil hållfasthet, runt 4-5 m, medan för långa band är det 5-7 m in i rullen. Ändeffektens längd verkar ha ett direkt samband med omkretsen på yttersta varvet, enligt författaren. För 8 mm band med okyld ände fås vanligtvis en ökning av hållfastheten efter 2,6 meter och sedan en sänkning vid 4 meter in i rullen. Efter 6 meter lägger sig hållfastheten på en konstant nivå. Försök gjordes även för att se om coilboxdonet gav någon effekt till den lägre hållfastheten i bandänden genom att kyla sista änden på bandet. Detta genomfördes genom att klippa bort sista änden på bandet efter coilbox och jämföra resultat från olika band med så nära egenskaper och processväg som möjligt. Resultatet visar att ändeffekten uppstår även på band med avklippt ände och slutsatsen blev att donet i coilbox inte påverkade ändeffekten utan uppkom efter coilbox. Resultat från tester med att värmebehandla änden visade att en tillräcklig hållfasthetsökning erhöles vid 650 °C i ca 10 min. Den största hållfasthetsökningen på 3 mm band erhöles vid 1,2 meter, det vill säga längst ut på rullen. Hållfasthetsökningen avtog sedan ju längre in i bandet provena togs. För 8 mm band med kyld ände erhöles samma resultat som vid 3 mm band vid 1,2 meter och inåt men vid okyld ände erhöles en betydligt mindre hållfasthetsökning än för kyld ände vid 1,2 meter medan vid 4,0-5,4 meter in i rullen, där hållfastheten från början var låg, erhöles en större hållfasthetsökning än vid 1,2 meter. Vid försök att bestämma partikelstorleksfördelningen erhöles en ökande partikelstorlek, 4,8 nm till 6 nm, för ökande temperatur på värmebehandlingen efter valsning, dessutom ökade även partikelstorleksfördelningen. Försök med att inte kyla bandänden efter färdigverket gav inte någon direkt skillnad på hållfastheten hos 3mm band. Däremot erhöles en sänkning av hållfastheten en bit in i bandet vid samtliga försök. För med 8mm:s band visade att bandänden erhöles sämre mekaniska egenskaper samt att ändeffekten sträckte sig längre in i materialet.

En annan studie som behandlar hållfasthetsvariationer och ändeffekter på varmvalsade EHS material [2] visade en kraftig minskning i hållfasthet på upp till 100 MPa de sista metrarna av bägge ändar på bandet. I kvalitetsgrupp 22 (den kvalitetsgrupp som Domex 700MC tillhör) uppvisar tjockare material en längre ändeffekt än ett tunt, 4 till 8 meter för material över 5mm tjockt samt upp till 5 meter för material tunnare än 5 mm. Detta resultat stämmer inte överens med [1] där författaren menade att inte fanns någon direkt skillnad mellan tunna och tjocka band. Försök har även gjorts i studien för att försöka visa var ändeffekten uppkommer. Även i denna undersökning klipptes bandets sista ände efter coilbox för att se om coilboxen påverkar ändeffekten. Resultatet visar att den inte påverkar eftersom ändeffekten ändå uppstod, vilket stämmer med resultat från den andra rapporten [1]. Detta menar författaren visar att ändeffekten uppkommer antingen i färdigvalsningen, kylsträckan eller i haspeln. Vidare menas att om donet i coilbox kylde

ned bandets ände så en ändeffekt uppstod skulle tunt material som har valsats ut mer i färdigverket ha en längre ändeffekt än den för det tjocka materialet, vilket inte stämmer med resultaten från hållfasthetsprovningen. Författaren menar också att det är svårt att avgöra hur långt ändeffekten sträcker sig in i bandet då skenmärken från rytterna i ugnen ger upphov till lägre hållfasthet och därigenom stör utvärderingen av ändeffekterna.

4.2 Svalningsförloppet efter haspling

En tredje undersökning beskriver kylförloppet av rullar efter varmvalsning [20]. Genom att variera bandtjockleken och begynnelsestemperaturen erhöles värden för simulering. Resultat från undersökningen visar att rullar av tjockare band (10mm) har en betydligt högre kylhastighet än den önskade på 50 °C/h, speciellt de första 15 minuterna. För tunnare band (2,5 mm) erhöles en svalningshastighet som inte skiljde så mycket från den önskade. Författaren anser att tjockare band kyls snabbare eftersom de har färre isolerande lager medan tunnare band kyls långsammare på grund av kontakten mellan varje varv är bättre. Detta sker eftersom momentkraften på haspeln inte är tillräcklig för få bra kontakter mellan varven vid haspling av tjockare band. Vid mätningar med högre temperatur av änden på bandet visade det sig att kylhastigheten ökade lite men samtidigt kommer det ta längre tid för temperaturen att nå en specifik temperatur. Författaren menar att om bandänden för tunnare material har en högre temperatur blir kylhastigheten acceptabel medan för tjockare material är den snabba initialkylhastigheten ett problem. Simuleringar med en huv placerad över rullen för att minska kylhastigheten visade ett bra resultat vilket skulle vara genomförbart i verkligheten, enligt författaren.

5 Utförande

Provningsen av variationen i hållfasthet över bandlängden har genomförts vid en av formatsträckorna på SSAB Tunnpååt i Borlänge. Innan klippning till format deformeras plåten för att eliminera krökningen på bandet som uppkommer vid hasplingen.

5.1 Ändeffekt provning

Provnings genomfördes på sju olika band med en tjocklek på 3 och 8 mm, se Tabell 3.

Tabell 3 Undersökta band och dess tjocklek

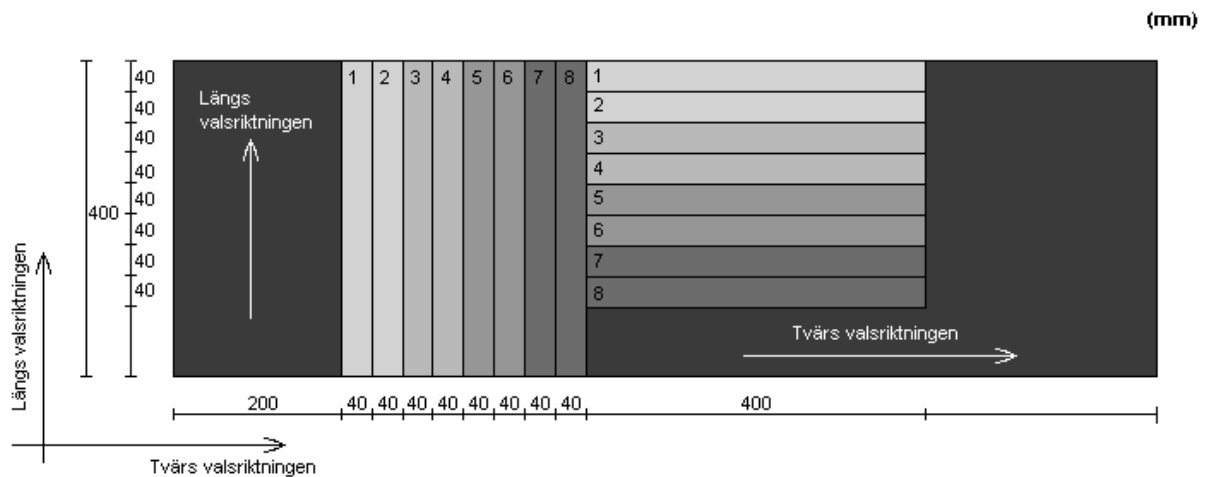
Råbandsnummer	Stålsort	Tjocklek (mm)	Beteckning
174460	Domex 700	3	A
176078	Domex 700	3	B
176079	Domex 700	3	C
176080	Domex 700	3	D
176081	Domex 700	3	E
175922	Domex 700	8	F
175924	Domex 700	8	G
224061	Domex 700	3	H
229054	Domex 700	3	I

Provningsen för att undersöka ändeffektens utbredning och variation genomfördes från råbanden i Tabell 4. Kuponger klipptes ut från slutänden och in mot mitten av bandet. Från dessa kuponger klipptes dragprovstavarna ut.

Från varje kupong tas 16 dragprovstavar, 8 från tvärs och 8 från längdriktningen, se Figur 5. Provningsen sker sedan med dubbelprov för att få säkrare mätvärden. Vid klippning av dragprovstavar, till en dimension av 40*4 cm, placerades midjan så att den inte hamnade ute vid valskanten på bandet för att minimera kanteffekter från valsningen. Dragprovstavararna frästes sedan ut.

Värmebehandling genomfördes för att undersöka om ändeffekternas utbredning går att minska genom att anlöpa proverna i olika temperaturer. Detta för att undersöka om det är en otillräcklig utskiljningshärdning som orsakar den lägre hållfastheten i slutet av bandet.

Dragproven är klippta så att samma läge på plåten får samma eller ingen värmebehandling. Läge 1 och 2 värmebehandlades inte, 3 och 4 värmebehandlades i 560 °C, 5 och 6 i 600 °C och 7 och 8 i 640 °C, det vill säga vid inom samma temperaturområde som vid hasplingen av rullarna. Samtliga dragprov värmebehandlades i 30 minuter.

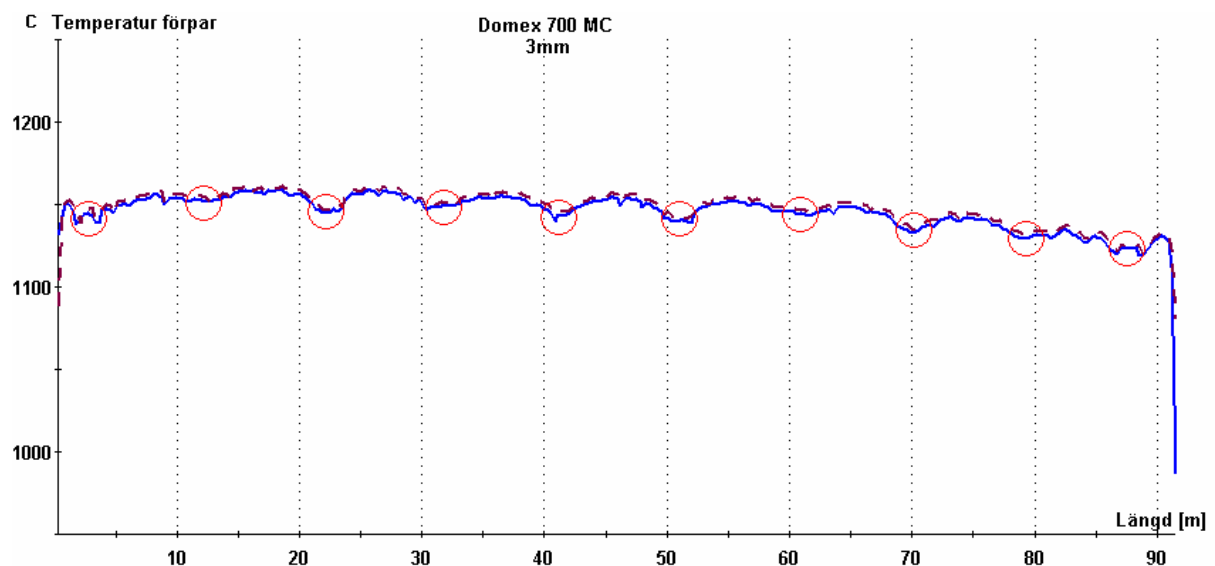


Figur 5 Klippning av dragprovstavar

5.2 Skenmärken

Skenmärkenas placering på det färdiga bandet beräknades utifrån temperaturmätning vid förparet. Detta för att de kalla zonerna som skenorna ger upphov till syns tydligas under förparsvalsningen. Mätningarna av placering på skenmärkena gjordes i diagram som loggas under körning. Genom att mäta hela ämnets längd i det aktuella sticket och sedan mäta efter hur långa sträckor bandet har kallare zoner kan placeringen på skenmärkena på det färdiga bandet beräknas. Ett loggat diagram med skenmärken som är inringat i diagrammet visas i Figur 6.

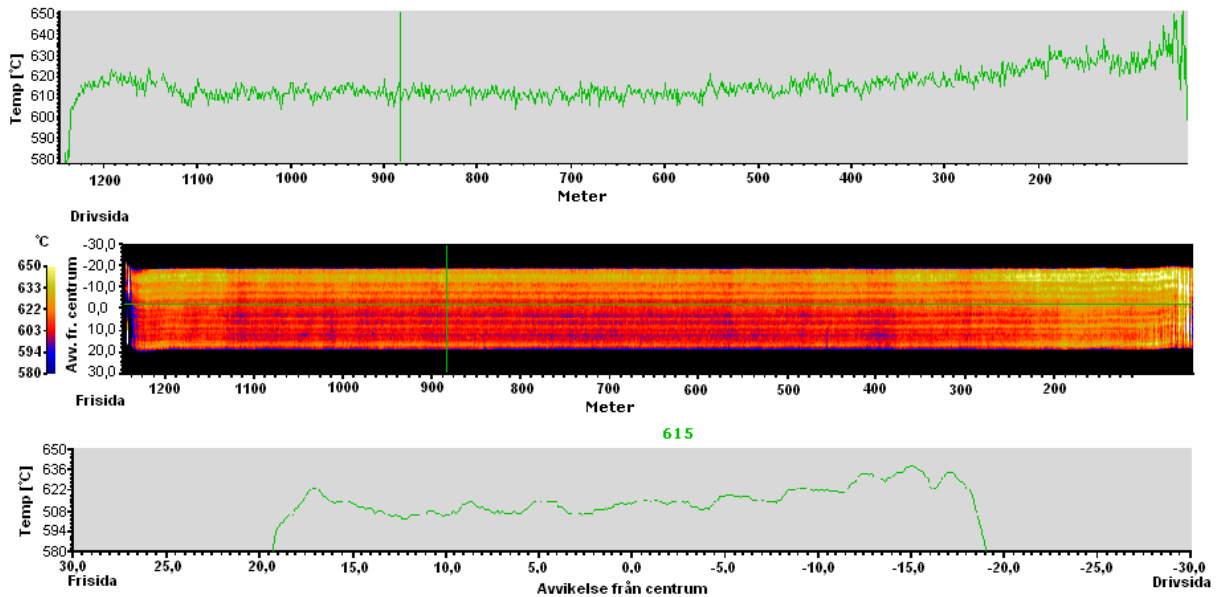
Mätningar av längden vid förpar skiljer sig åt beroende vilken mätare som används. Dessutom varierar avklippet efter coilbox vilket saknar data. Osäkerheten i dessa mätvärden och avklipp har resulterat i variationer av placeringen av skenmärkena på det färdiga bandet. Placeringen på skenmärkena är ungefärliga och visas i kap.6.4.



Figur 6 Mätning av skenmärken gnom temperaturvariationer på ämnet efter förparet

5.3 Mätning av temperatur efter kylsträckan, hasplingstemperatur

Hasplingstemperaturen har en väldigt stor inverkan på plåtens slutgiltiga mekaniska egenskaper. När bandet hasplats sker i huvudsak tillväxt och upplösning av partiklar. Detta i sin tur skapar i huvudsak den hållfasthetsökning som uppkommer genom utskiljningshärdningen. Genom att mäta bandtemperaturen med en så kallad ”scannande pyrometer” efter kylsträckan kan en uppfattning om hur temperaturen varierar innan hasplingen. Detta påverkar hasplingstemperaturen och svalningsförloppet på rullen. Figur 7 visar temperaturprofilen längs band I, det vill säga ett 3 mm band. Endast en sådan mätning av temperaturen på de hållfasthetstestade banden har genomförts.



Figur 7 Temperaturupptagningar Landscan på 3 mm band efter kylsträckan

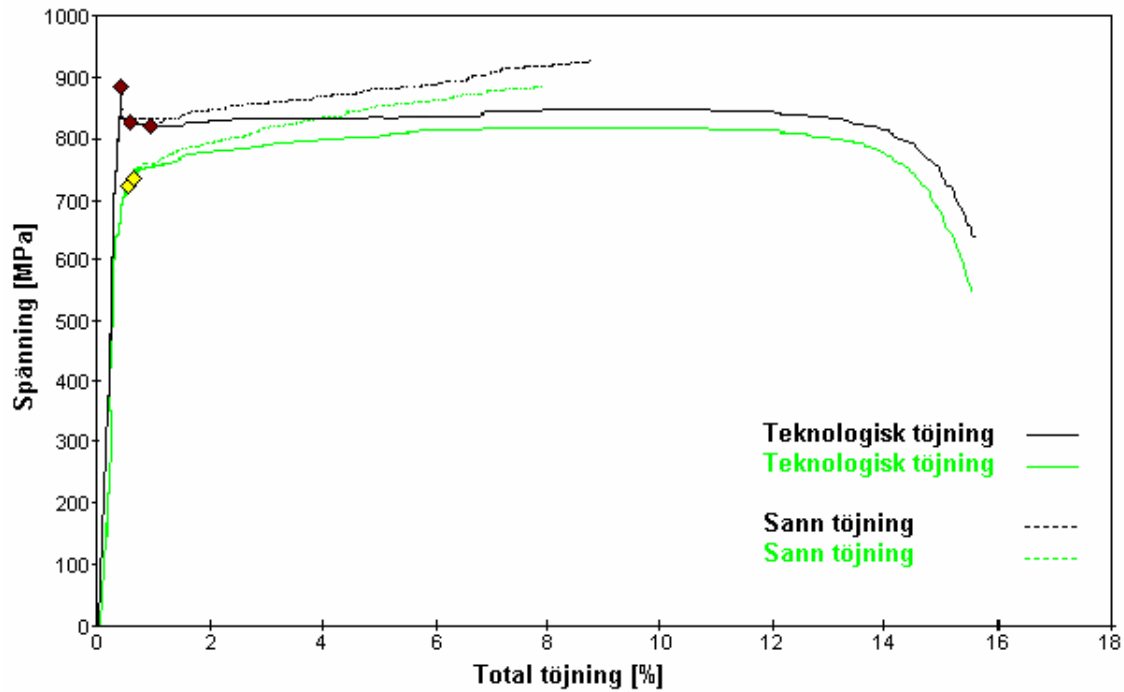
5.4 Jämförelse mellan prover med och utan flytområde

Prover som värmebehandlats får normalt tillbaka sitt flytområde. I flytområdet sker deformationen inhomogent genom så kallade lüdersband som propagerar genom materialet. Deformationen startar då vid det svagaste stället på materialet (spänningskoncentrationer) och vidare i materialet. Banden uppkommer vid t.ex. en lokal inhomogenitet i materialet och sprider sig vidare genom att den plastiska deformationen fortgår. När lüdersbanden spridit sig genom hela provstavens midja fortgår deformationen homogent i materialet. Deformationen som åstadkommit genom den inhomogena deformationen kallas lüderstöjningen [21]. I obehandlade prover som deformerats efter varmvalsprocessen i riktverk uppkommer ingen lüderstöjning eftersom deformationen i riktverket har varit tillräckligt stor för att området ska ha passerats, se Figur 8. När proverna värmebehandlats återhämtade de sig, d.v.s. dislokationer ordnar upp sig i en mer ordnad struktur, minskning av energin. Dessutom sker en diffusion av inlösta atomer till dislokationer vilket resulterar i en upplösning av dislokationerna. När de värmebehandlade proverna sedan dragprovas har materialet fått tillbaka sin skarpa sträckgräns och lüdersområde [22].

Det är omöjligt att jämföra värden på övre och undre sträckgräns med 0,2 % plastisk töjning vid olika prover för att undersöka effekten av värmebehandlingen är omöjligt

eftersom dessa värden beskriver olika saker. Det bästa sättet är istället att jämföra brottgränserna i de olika proven eftersom dessa definieras på samma sätt oberoende av flytområde.

Dragprovkurvor på ett värmebehandlat material med flytområde och ett obehandlat visas i Figur 8. Proverna är utförda på samma rulle och vid samma längd från sista änden.



Figur 8 Dragprov av provstavar med och utan flytområde från samma band och längd

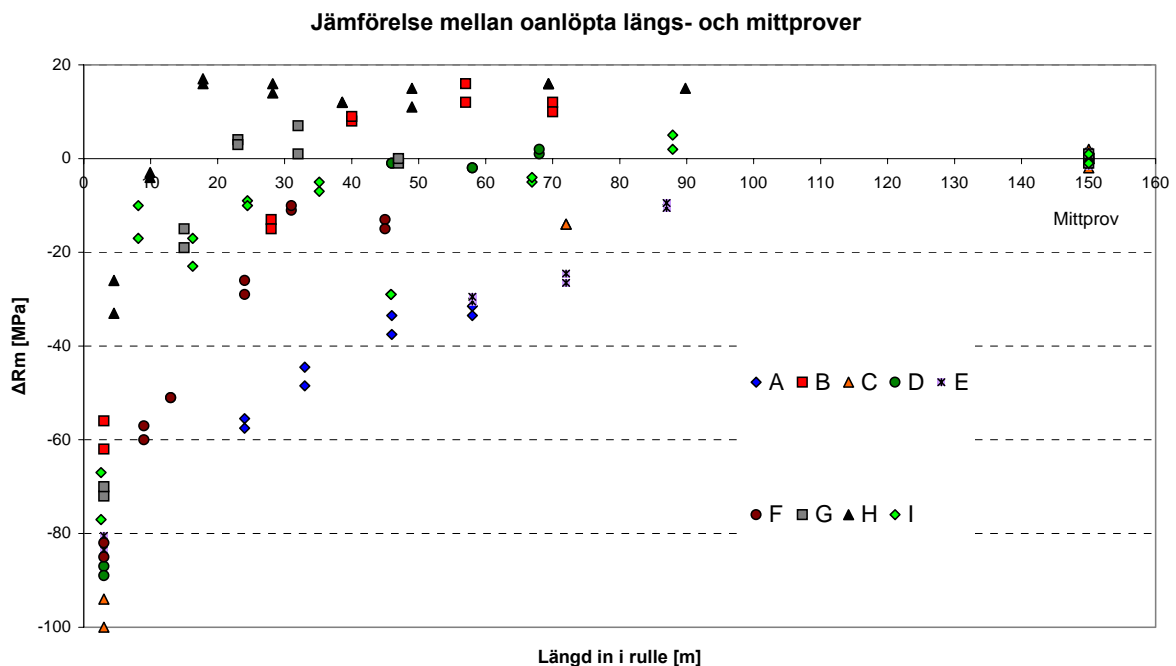
6 Resultat

Resultat från litteratursökningen som ansetts vara givande i denna rapport finns beskrivna i diskussionsdelen. Coilboxdornets kylande effekt på bandänden har inte tagit hänsyn till då resultat från två tidigare undersökningar visar att det inte uppkommer någon direkt skillnad på mellan band där sista änden har klippts av efter hasplingen i coilbox. De tidigare undersökningarna har endast beskrivits ändeffekten de första 20 metrarna medan den här undersökningen går betydligt längre in i banden.

Resultaten är baserade på hållfasthetsmätningar från oanlöpta och anlöpta prover. De prov som driften tar för att säkerhetsställa att bandet uppfyller rätt kvalitet är inte undersökta.

6.1 Hållfasthetsavvikelse längs bandlängden

I Figur 9 visas brottgränsjämförelse mellan oanlöpta längs- och mittprover. Diagrammet är uppbyggt genom att subtrahera provresultatet med dess bands mittprov. Proven som uppnår en skillnad på 0 MPa har därmed samma brotthållfasthet som mittprovet. Vissa band, A, E och C uppnår inte samma hållfasthet som mittprovet under testintervallet. Påpekas kan att dessa band är hasplade i haspel 2. De övriga banden uppnår hållfasthetsvärden motsvarande mittprovet mellan 20-90 meter in i bandet.



Figur 9 Brottgrensjämförelse mellan oanlöpta och dess mittprov, längsprover

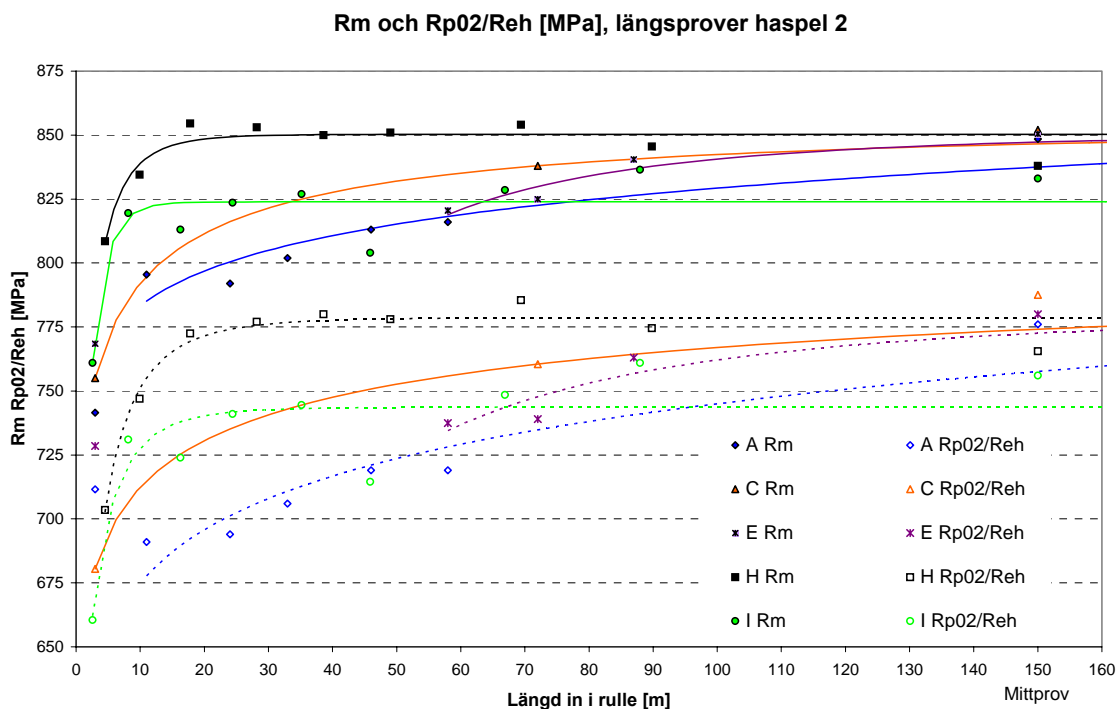
Figur 28 och 29 i bilaga 1, visar samtliga hållfasthetsresultat från obehandlade längsprover från bandänden inåt. Resultaten redovisas i brottgräns och övre sträckgräns i obehandlat tillstånd.

6.1.1 Hållfasthet hos längsprover, haspelvis

Figur 10, visar resultatet av obehandlade längsprover från band som hasplats i haspel 2. Provresultaten är baserade på medelvärden av dubbelproven. Dessutom visas kurvanpassningar som anpassats mot provresultaten. Förstaproven för band A och E har inte tagits med i anpassningen på grund av deras flytområde. Kurvanpassningen beskrivs av en sigmoid som med hjälp av Mathcad har anpassats mot kurvorna. Datakoderna samt beskrivning av tillvägagångssättet finns bifogad i bilaga 3.

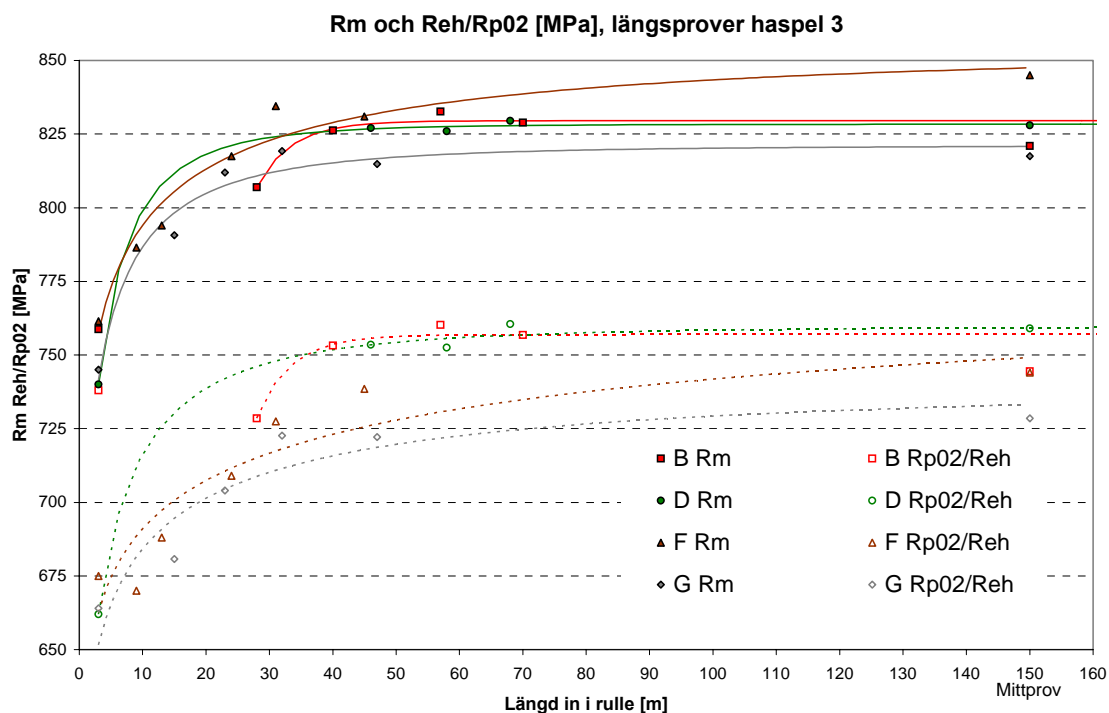
Tydliga skillnader uppkommer redan efter 10 m. För band H stabiliseras hållfastheten efter 15-20 meter medan de andra proverna har en betydligt längre ändeffekt. Band I tycks ha en tidig stabilisering med en hög hållfasthet på andraprovet vilket även kurvanpassningen visar. De övriga proverna för detta band ligger emellertid i samma intervall som de band med en långsammare ökning av hållfastheten. Band A och E uppnår samma nivå som mittproven efter mellan 100 och 130 meter enligt kurvanpassningarna. Det är dock svårt att avgöra den exakta längden på ändeffekten för dessa band då det saknas prov efter 60 meter för band A och efter 90 meter för band E. Även för band C är stabiliseringsgränsen svår att avgöra eftersom det finns få mätpunkter. Vid mittproverna, 150 m, är variationen i hållfasthet mellan banden små. Band I har troligtvis en lägre hållfasthet efter 45 m på grund av ett skenmärke, se Figur 18.

Den slutliga brottgränsen för samtliga längsprover i haspel 2 och 3 ligger mellan 815-855 MPa. Mittproven har ett Rp02-värde mellan 722-789 MPa.



Figur 10 Obehandlade längsprover, haspel 2, brottgräns och övre sträckgräns/Rp02

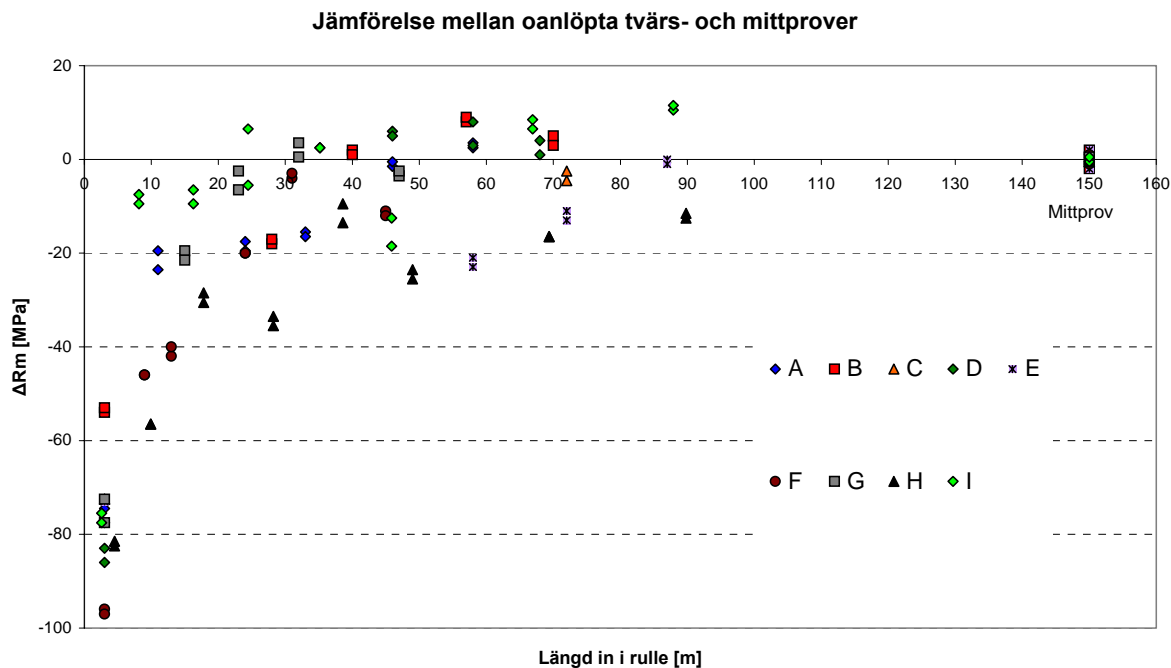
Resultat från obehandlade längsprover från haspel 3 och kurvanpassningar visas i Figur 11. Differensen mellan kurvorna är mindre än för haspel 2 och stabilitet i resultaten för brotthållfastheten sker i samtliga undersökta band mellan 40 och 60 meter. De två 3 mm banden tycks, enligt kurvanpassningarna, ha en kortare ändeffekt än 8 mm banden. Dock har 8 mm banden uppnått en liknande hållfasthet som mittproven runt samma värden som för 3 mm banden. Stabiliseringsgränsen för band D är svår att avgöra då mätvärden inte finns efter första provet fram till 45 meter. Bandet har dock stabiliserats runt ett värde nära mittprovets vid prov 2.



Figur 11 Obehandlade längsprover, haspel 3, brottgräns och övre sträckgräns/Rp02

6.2 Hållfasthetsavvikelse tvärs bandlängden

Skillnaden på hur lång ändeffekten är varierar även stort då tvärsprover jämförs. Figur 12 visar jämförelse mellan oanlöpta tvärsprover och mittprover. Diagrammet är konstruerat genom att sätta differensen till noll då mitthållfastheten uppnås. Skillnaden mellan längden på bandens ändeffekter syns tydligt och varierar stort. Mellan band G och band E skiljer det ca. 60 meter då samma hållfasthet som mittprovet uppnås. Band H tycks inte uppnå samma hållfasthet som mittprovet vid det undersökta testintervallet.



Figur 12 Brottgränsjämförelse mellan oanlöpta och mittprov, tvärsprover

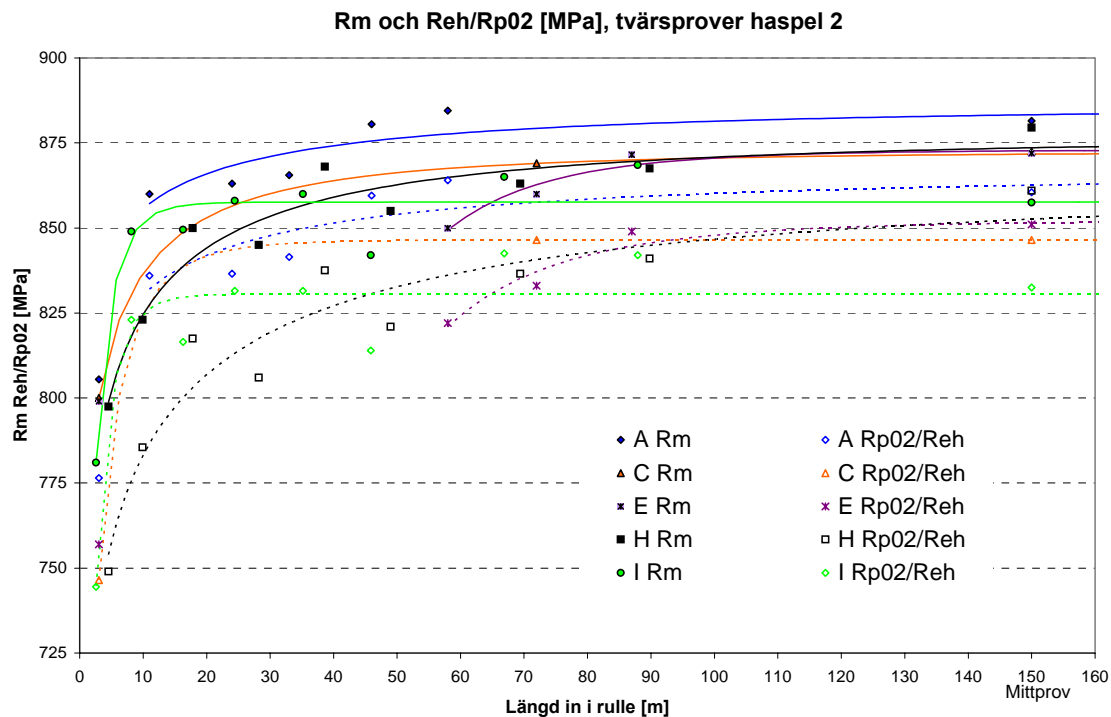
6.2.1 Hållfasthet hos tvärsprover, haspelvis

Figur 30 och 31 i bilaga 1, visar samtliga hållfasthetsresultat från obehandlade tvärsprover från bandänden inåt. Resultaten redovisas i brottgräns och övre sträckgräns i obehandlat tillstånd.

I Figur 13 visas resultat av tvärsprover från band som hasplats i haspel 2. Provresultaten är baserade på medelvärden av dubbelproven. Dessutom visas kurvanpassningar som anpassats mot provresultaten. Förstaprovorna för band A och E inte tagits med i anpassningen på grund av dess flytområde. Kurvanpassningen beskrivs av en sigmoid som med hjälp av Mathcad har anpassats mot kurvorna. Datakoderna samt beskrivning av tillvägagångssättet finns bifogad i bilaga 3.

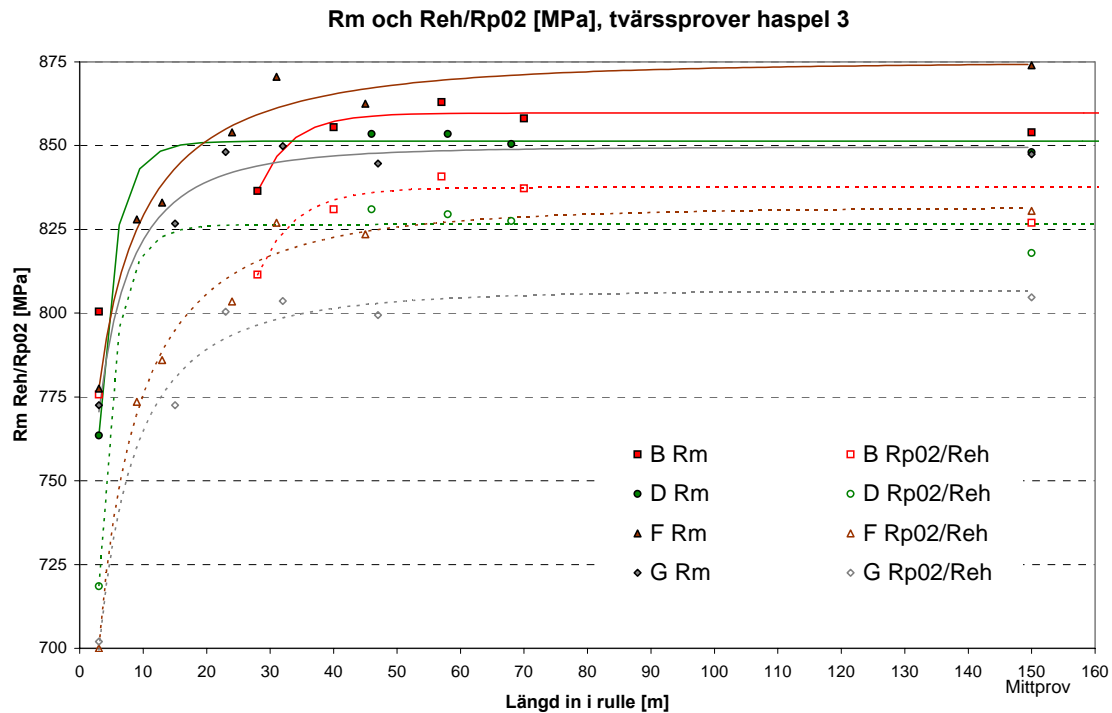
Band A når stabilitet efter ca. 50 m medan band I tycks nå det redan vid ca. 25 meter. Band C och band E har få mätpunkter och är därför svåra att avgöra när stabilitet uppnås. Mät punkterna för dessa band ligger i samma område som de övriga och mittprovshållfastheten uppnåts inom intervallet. Band H har en betydligt långsammare ökning av hållfastheten tvärs än längs och uppnår inte samma värde som mitthållfastheten inom provintervallet. Dessutom ökar hållfastheten snabbare för band A än vad som var fallet i längsprovorna. Stabilitet för kurvorna uppnås mellan 25 och omkring 100 meter. Skillnaden mellan sträck- och brottgränsen är mindre mellan tvärsprover än längsprover.

Brottgränsen för samtliga mittprovorna, tvärsled, är högre, 847 MPa till 883 MPa, än motsvarande prov i längsled. Även sträckgränsen på mittproven uppvisar ett högre resultat än för längsprovorna, 803-862 MPa jämfört med 722-789 MPa.



Figur 13 Obehandlade tvärsprover, haspel 2, brottgräns och övre sträckgräns/Rp02

I Figur 14 visas tvärsprover på 3 och 8 mm band som är hasplade i haspel 3 samt kurvanpassningar. Brottgränsmätningen visar att band B och band D stabiliserar sig runt ett värde runt 45 m och 20 m enligt kurvanpassningarna. Ändeffektens längd för band D är dock väldigt osäker då det saknas prov innan 45 meter vilket resulterar i att den snabba hållfasthetsökningen som kurvanpassningen uppvisar är väldigt osäker. 8 mm proverna band F och band G stabiliserar sig runt 40 meter. Band F har den högsta brotthållfasthet tvärs jämfört med de andra som hasplats i haspel 3. Kurvorna följer ungefär samma mönster, förutom band D. Band B har en hög sträckgräns vid det första provet vilket beror på att detta prov har kvar sitt flytområde. Skillnaden mellan sträck- och brottgränsen är mindre mellan tvärsprover än längsprover. Påpekas bör också att inget av tvärsvärdena för sträckgränsen understiger 700 MPa.



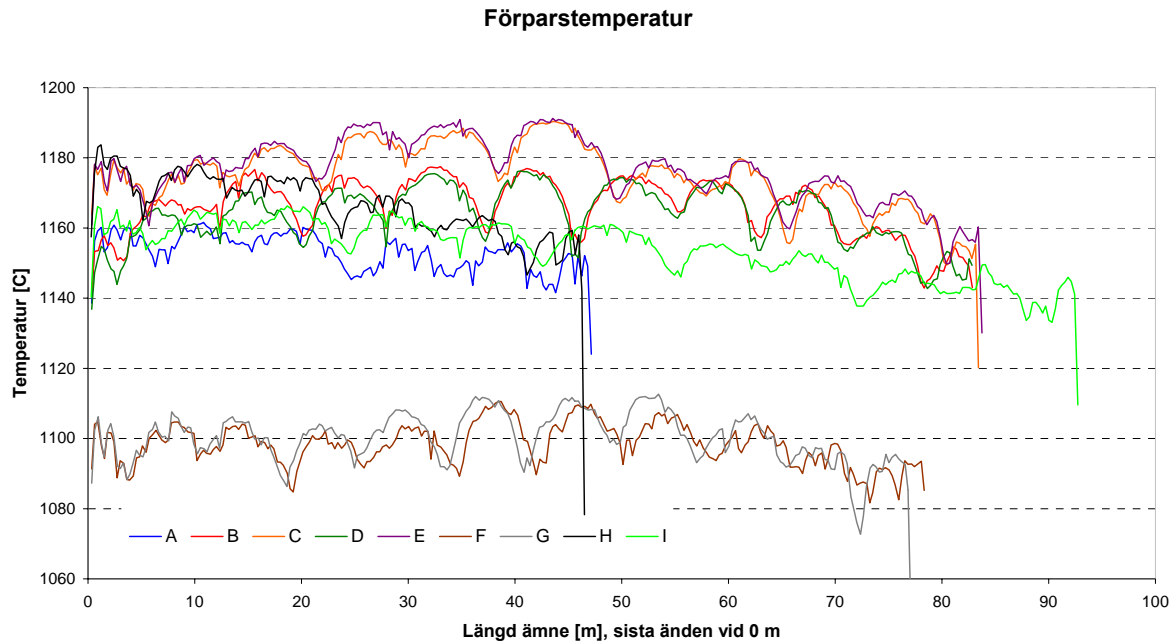
Figur 14 Obehandlade tvärsprover, haspel 3, brottgräns och övre sträckgräns/Rp02

Figur 32 och 33 i bilaga 2, visar brottgränsspridningen, haspelvis, för längs- respektive tvärsproverna. Ingen större spridning vare sig mellan hasplarna eller mellan längs och tvärsprover kan tydas. Det är i stort sett bara ett band som avviker tydligt vid längsproverna.

6.3 Förparstemperatur

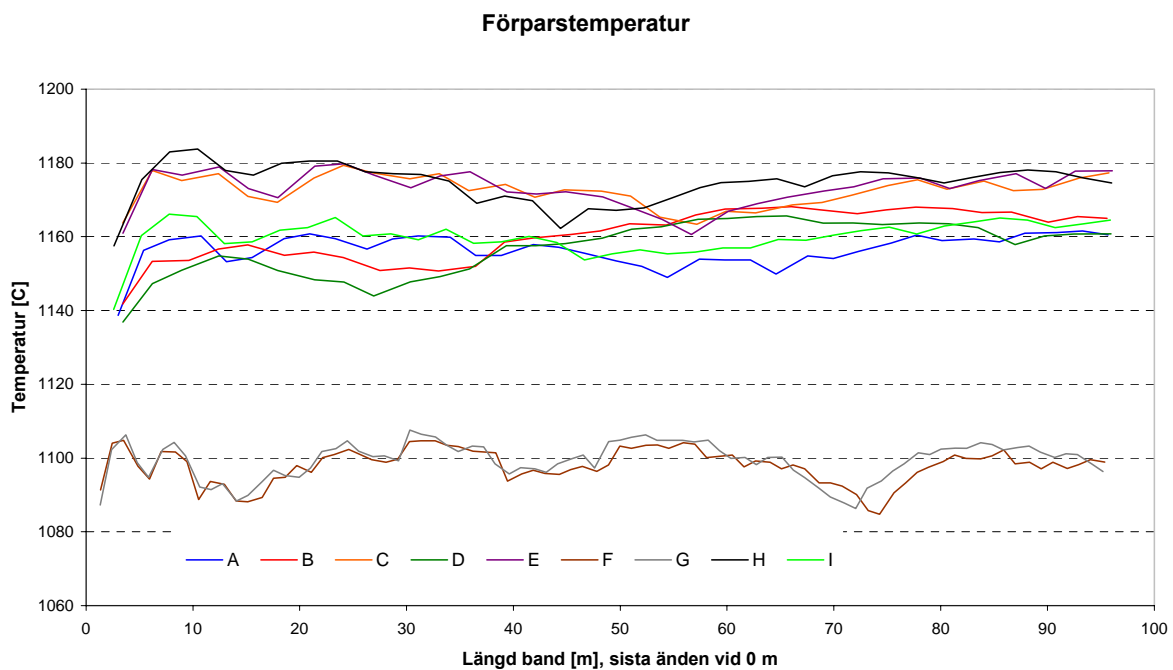
Vid tillverkningen är temperaturvariationerna mellan banden större vid valsning i förpar än vid haspling, vilket visas i Figur 15, 16 och 19. Banden band F och G är 8 mm:s band som valsas vid lägre temperatur än 3 mm band.

Placeringen på skenmärkena syns tydligt på vissa band där det finns ett tydliga minima, se Figur 15. Utifrån dessa sänkningar i temperatur kan placeringen av skenmärken på det färdiga bandet beräknas.



Figur 15 Valsningstemperatur vid förpar, längd ämne är längden på ämnet efter förpar

Figur 16 visar temperaturvariationerna vid förparet inom det aktuella provintervall. Längden in i bandet är beräknad och visar var på det slutliga bandet temperaturvariationerna i förparet hamnar. Band H, band E och band C har en liknande temperaturprofil längs bandet vid förparsvalsningen. Det skiljer generellt som mest 30°C för banden A, B, D och I jämfört med band C, E och H de första 40 metrarna.

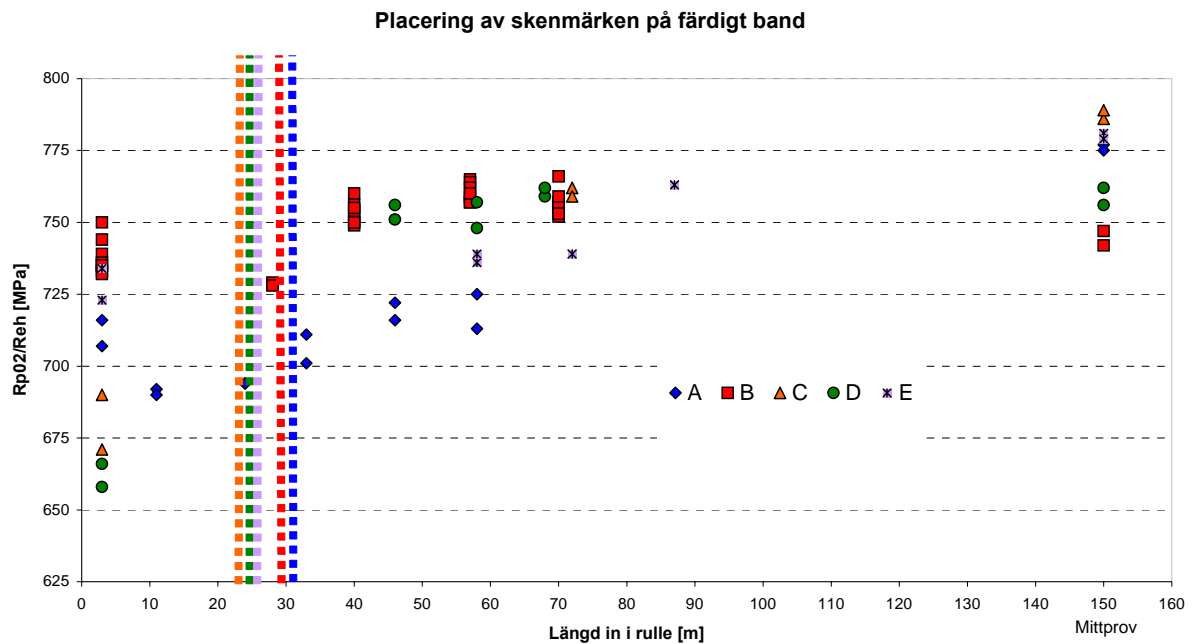


Figur 16 Förparstemperatur, vid aktuellt provintervall

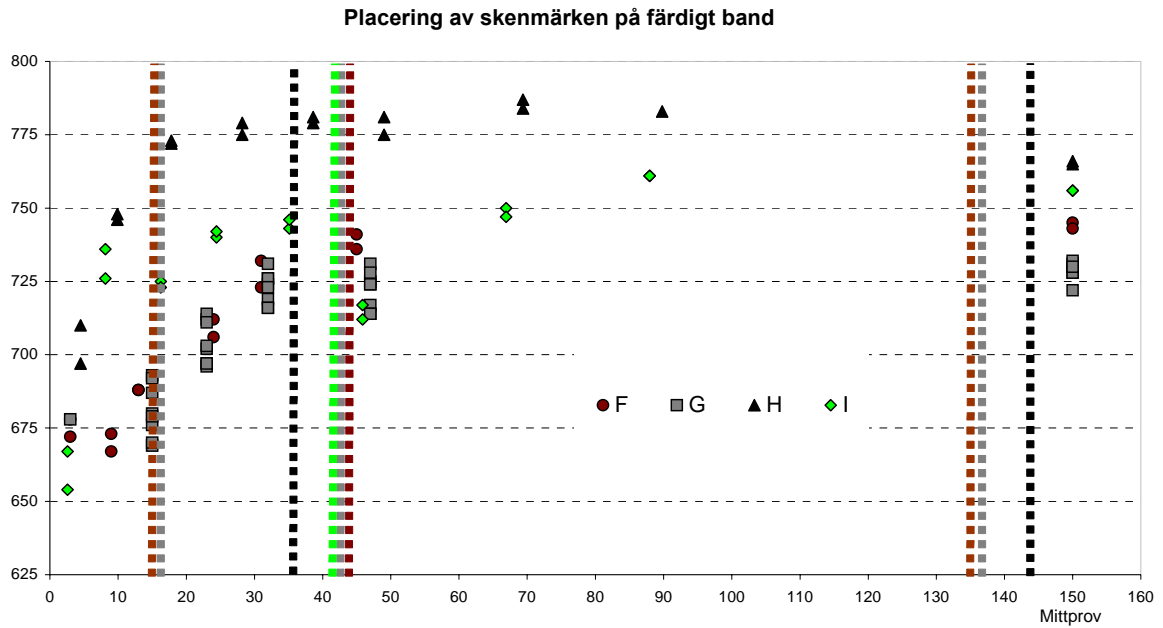
6.4 Skenmärken

Skenmärkesdiagrammen har en viss osäkerhet. Anledningen till detta är att mätningar av skenmärkena gjordes vid förparet och att längdberäkningar från olika loggningssystem visar något olika resultat. Små variationer i mätningarna påverkar resultatet stort då ämnet deformerats från runt 21 mm ned till 3 eller 8 mm i färdigverket utan att breddas, det vill säga med en förlängning på mellan 7 och 2,6. Det betyder att mätningarna blir störningskänsliga och då banden klipps efter coilbox utan att längden på avklippet mäts, blir värden på skenmärkesplaceringen något osäkra.

Resultat från Figur 17 och 18 visar skenmärkenas ungefärliga placering längs bandlängden samt sträckgränsen på längsprover. Resultat från beräkningar och undersökningar av kurvorna visar på ett fall där ett skenmärke tydligt påverkat hållfastheten, band I efter 46 meter. Även prov efter 28 meter för band B skulle kunna ha påverkats av ett skenmärke men då prov närmare bandände saknas, går det inte att säkerställa om det är en trend på kurvan eller om det är en enstaka sänkning i av hållfastheten. Band A kan även ha påverkats av ett skenmärke men sänkningen i hållfasthet följer trenden på bandet i övrigt och därav bör det vara något annat som påverkat hållfastheten ytterligare.



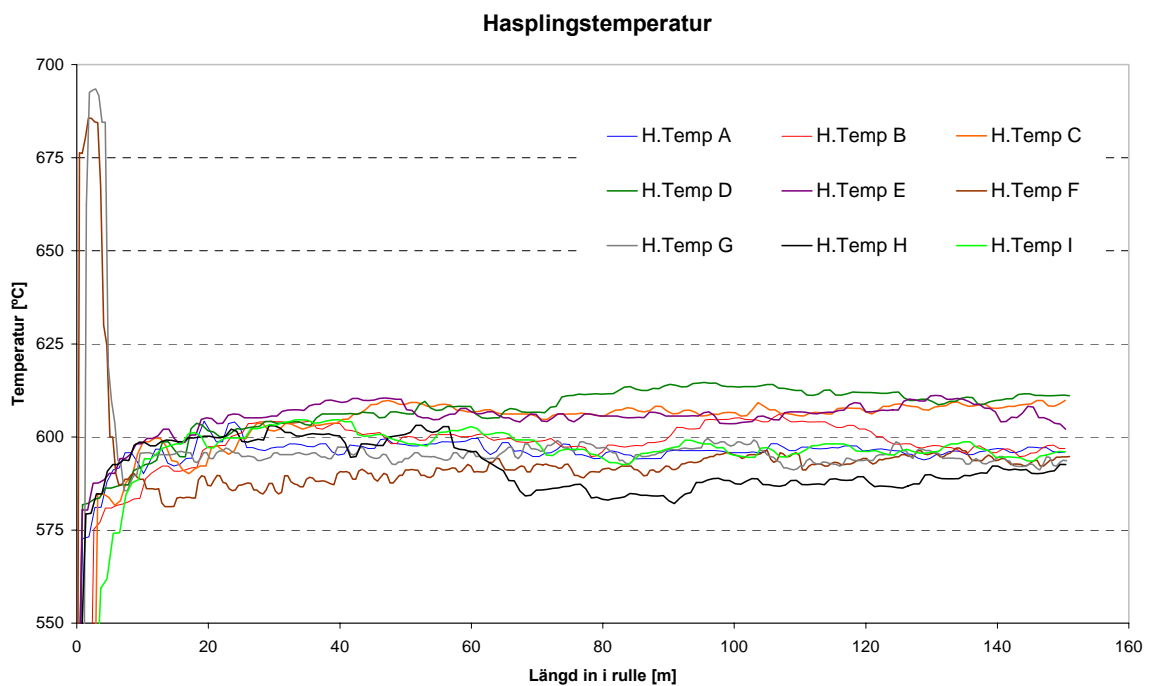
Figur 17 Uppskattade skenmärkesplaceringar på färdigt band



Figur 18 Uppskattade skenmärksplaceringar på färdigt band

6.5 Hasplingstemperatur

Hasplingstemperaturskillnaden är marginell mellan banden, vilket visas i Figur 19. Den enda direkta skillnaden är att 8 mm band, F och G, har en annan kylstrategi på bandändan. Alla band hasplas i genomsnitt runt måltemperaturen på 600°C, som skall vara optimal temperatur.



Figur 19 Hasplingstemperaturer för band hasplade i haspel 2 och 3

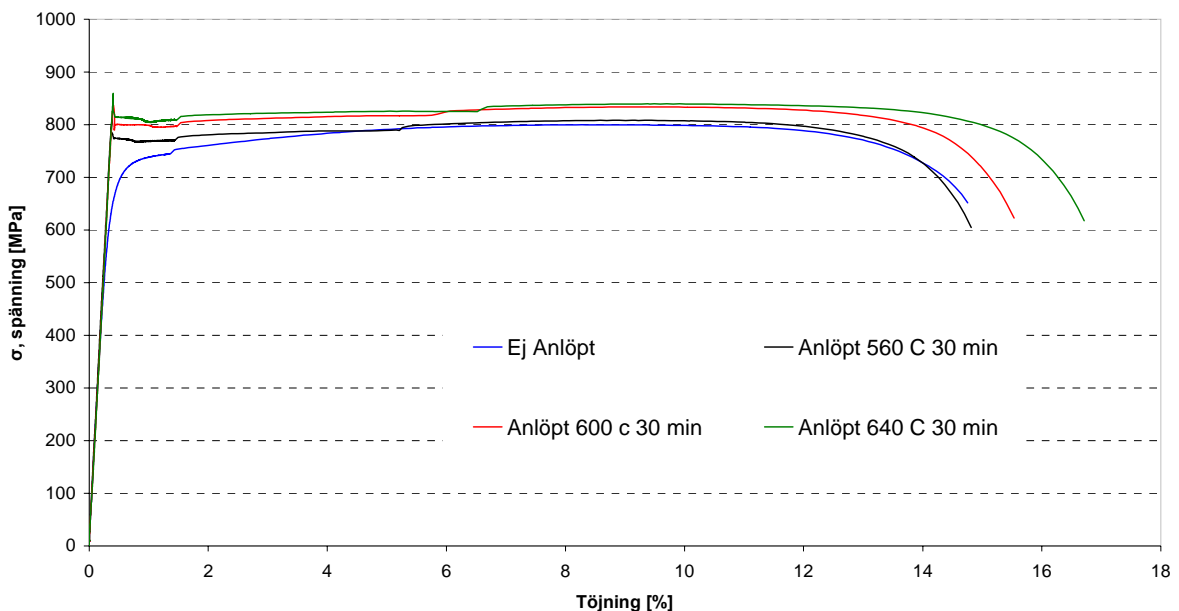
6.6 Anlöpningseffekt

Värmebehandlingar i haspeltemperaturområdet utfördes i syfte att undersöka om den lägre hållfastheten i bandänden beror på otillräcklig utskiljningshärdning orsakad av en snabb kylhastighet av yttre varven på rullen. Längs- och tvärsprover anlöptes i 30 min vid 560, 600 och 640 °C. Resultaten av dessa värmebehandlingar visas i olika typer av jämförande diagram nedan.

Som tidigare nämnts har längsgående prover tappat sitt flytområde genom ett riktningssvängande. Det första jämförande diagrammet, Figur 20, visar dragprovkurvor för ett material som värmebehandlats i jämförelse med ett obehandlat.

De värmebehandlade återfår sitt flytområde efter värmebehandlingen och sträckgränsen ökar markant medan brottgränsens ökning är betydligt mindre. Då en jämförelse mellan Reh/Rel för material med flytområde mot Rp02 för material utan flytområde inte är givande, jämförs endast brottgränsen i följande kapitel då denna ger det mest korrekta värdet på ökningen i hållfasthet.

Jämförelse mellan dragprovkurvor



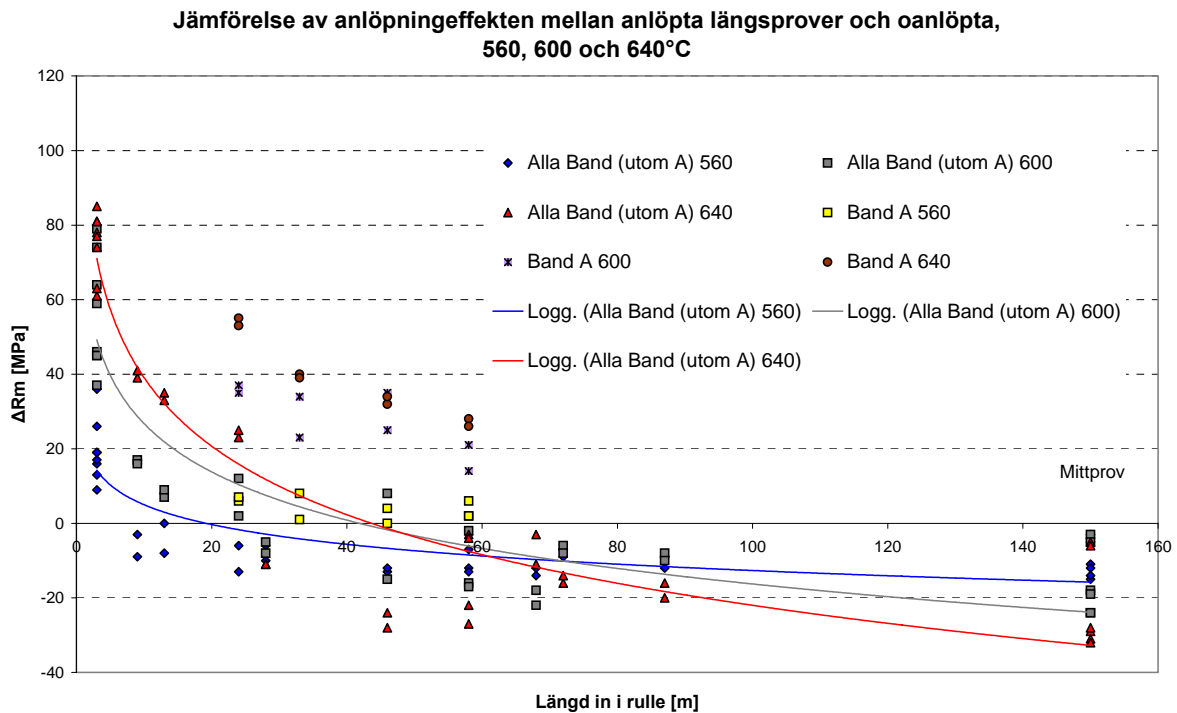
Figur 20 Dragprovkurvor för oanlöpta och anlöpta längsprov vid samma provlängd

Anlöpningens effekt in i bandet visas i Figur 21-23 där anlöpta prover jämförts med motsvarande oanlöpta band vid samma provläggning. Alla anlöpningar har genomförts som dubbelprov. Tiden för testen har varit den samma oberoende av temperatur.

Stor skillnad på resultaten visas vid första provet för rullarna där band D skiljer sig stort från mönstret den övriga kurvan uppvisar. Första provet verkar inte påverkas nämnvärt av värmebehandlingen varav det resultatet bortses ifrån.

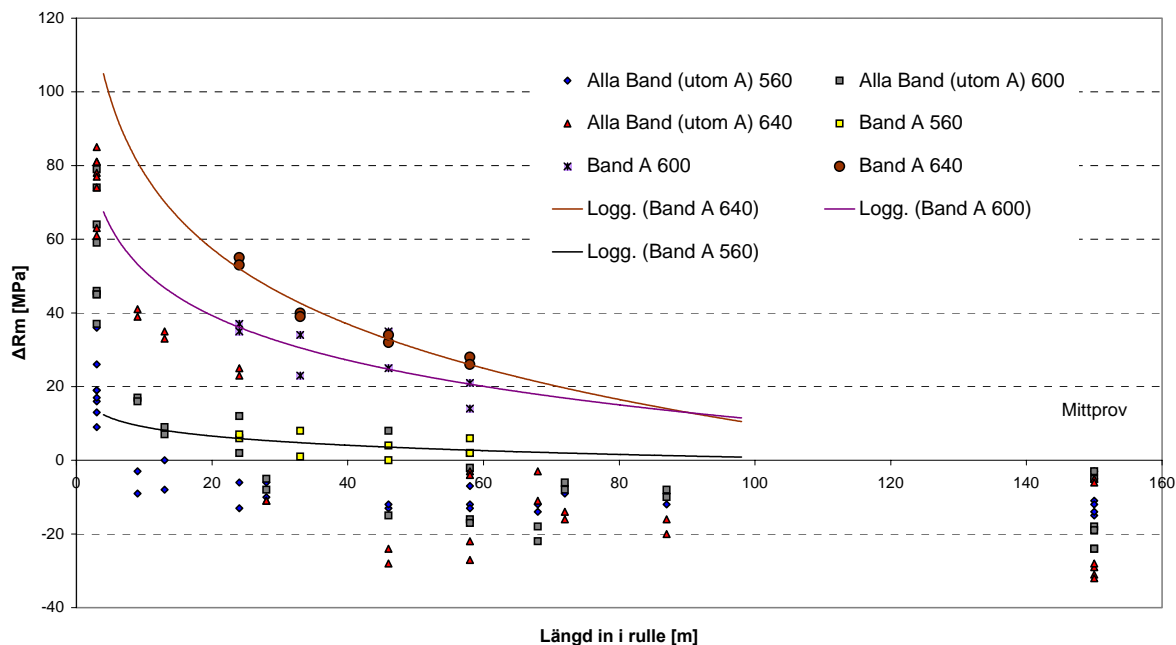
I Figur 21-23 visas brottgränsens variation in i bandet för prov som värmebehandlats vid 560, 600 och 640 °C. Diagrammen visar anlöpningseffekten i jämförelse med motsvarande prov vid samma provläge. Effekten av värmebehandling är stor för de proverna vid bandänden medan den minskar drastiskt längre in i bandet. Vissa band får endast en negativ effekt av värmebehandlingen vilket uppstår för prover längre in i bandet. Detta visas i band B och band D för längsgående prover. Längsproverna för band A får en liten positiv effekt mellan 20 och 60 meter vid lägsta anlöpningstemperaturen. Dessa prov har samtidigt en lägre hållfasthet än övriga innan de värmebehandlats.

Skillnaden ökar från första provet och in i bandet för de övriga rullarna då anlöpningstemperaturen ökar. Den positiva effekten av värmebehandlingen sträcker sig ca. 40 meter in i bandet förutom för de längsgående proverna i band A där samtliga prov får en stor hållfasthetsökning längs valsriktningen. Detta visas i separata kurvanpassningar i Figur 22. Band A får däremot en liknande brotthållfasthetsökning som övriga band för tvärsproverna varvid dessa har tagits med i samma kurvanpassning. Detta visas i Figur 23.



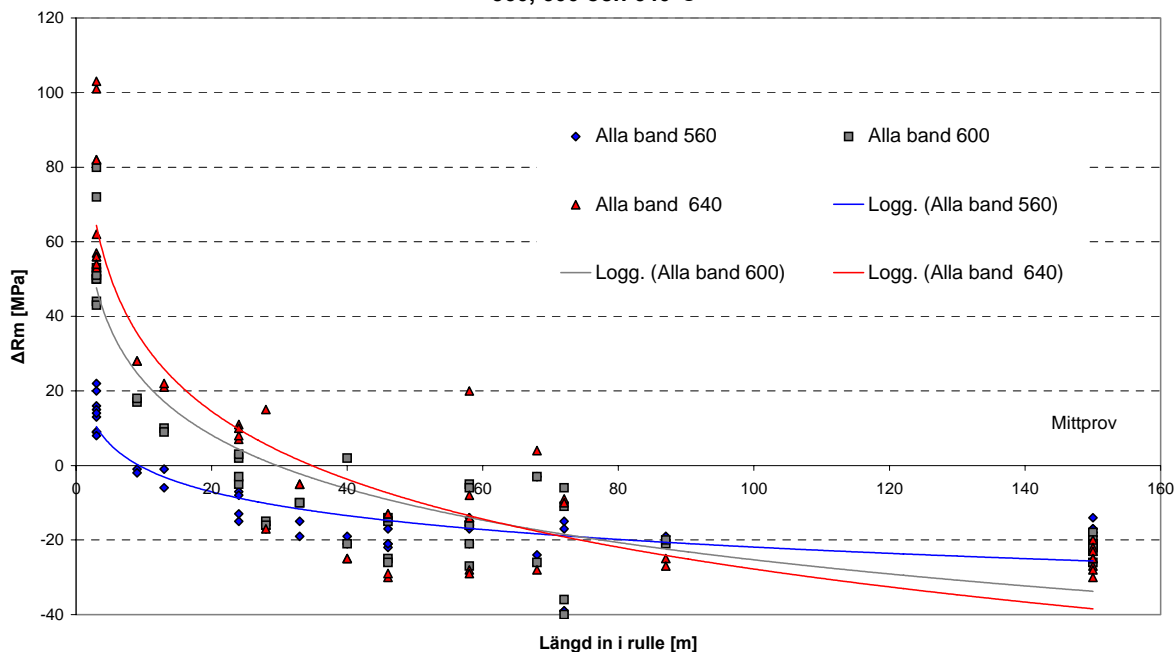
Figur 21 Brotthållfasthetsjämförelse av anlöpningseffekten mellan anlöpta i 560, 600 och 640 °C och oanlöpta, längsprover, kurvanpassning för samtliga band utom A

Jämförelse av anlöpningseffekten mellan anlöpta längsprover och oanlöpta, 560, 600 och 640°C



Figur 22 Brottgränsjämförelse av anlöpningseffekten mellan anlöpta i 560, 600 och 640°C och oanlöpta, längsprover, kurvanpassning för band A

Jämförelse av anlöpningseffekten mellan anlöpta tvärsprover och oanlöpta, 560, 600 och 640°C



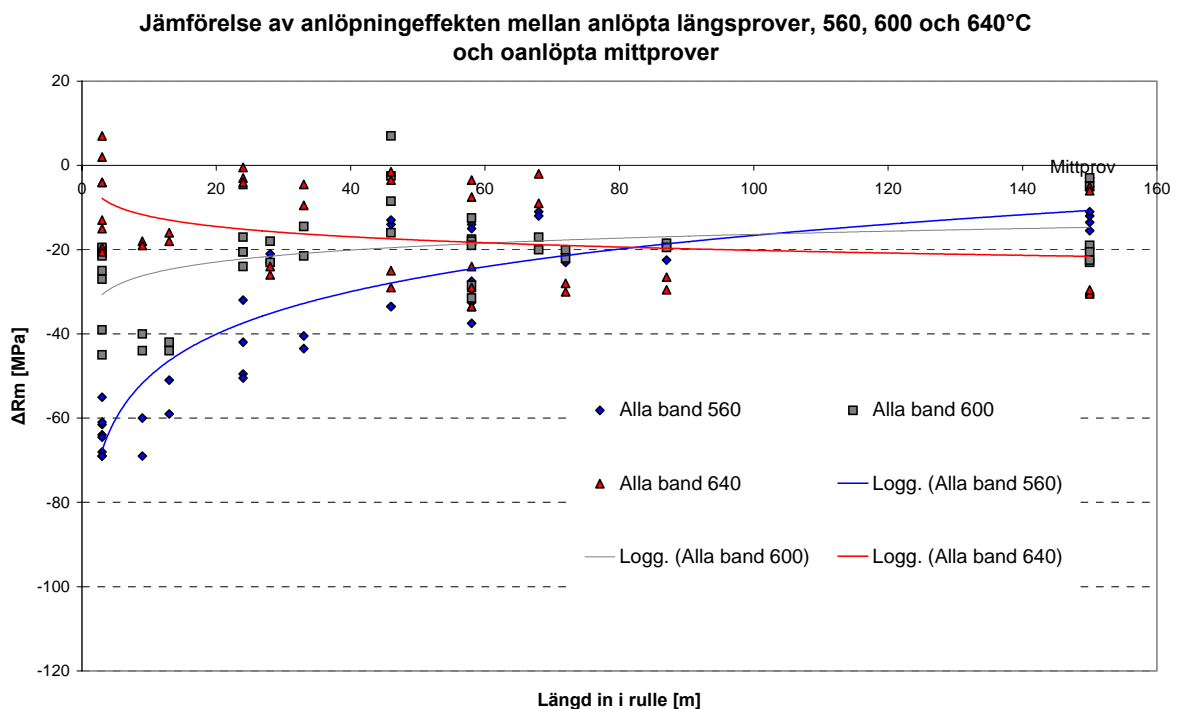
Figur 23 Brottgränsjämförelse av anlöpningseffekten mellan anlöpta i 560, 600 och 640°C och oanlöpta, tvärsprover

Anlöpningseffekten har även jämförts genom att sätta det oanlöpta mittprovet som referens. Från detta har alla prover, anlöpta och oanlöpta, jämförts genom att subtrahera provresultatet med medelvärdet av mittprovet för samma band. Uppskattningsvis, om

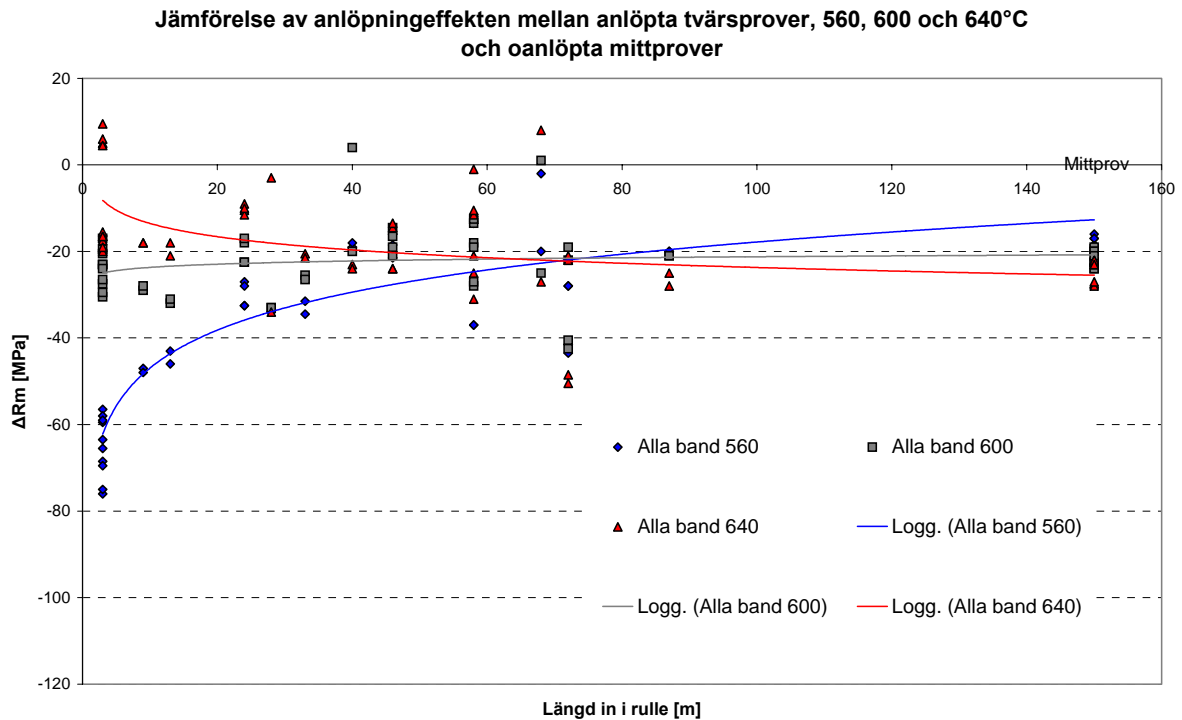
processparametrarna är optimala, ska mittprovet vara det prov som har högst hållfasthet. Detta betyder att kurvorna kommer idealt att nå en hållfasthetsskillnad runt noll om detta antagande stämmer. Vidare bör eventuella skillnader i processparametrarna mellan de olika banden subtraheras bort genom att jämförelsen är genomförd med det oanlöpta mittprovet som differensmått varvid endast ändeffekten mellan banden jämförs.

Figurerna 24 och 25 visar brottgränsens påverkan av anlöpningen i jämförelse med mittprovets brottgräns. Resultatet från figurerna visar att brottgränsen går emot samma värde som mittprovet. Eftersom första provet för band D inte påverkas av värmebehandlingen kan detta prov bortses ifrån. Brottgränsens påverkan är som störst för de första 30 metrarna samt för de rullar som ligger relativt långt under mittprovets värde 20-60 meter in i bandet, d.v.s. band A och band E. Alla resultat tenderar att gå emot värden mellan 0 och -30 MPa vid högsta anlöpningstemperaturen.

Kurvornas utseende påverkas mycket av värmebehandlingen. Proven i början av bandet påverkas mest medan prov längre in påverkas mindre eller får en negativ effekt. Detta får som följd att kurvorna blir mer flacka vid högre anlöpningstemperatur. Anlöpningen i 560 °C har näst intill ingen effekt på hållfastheten, förutom i början av banden, vilket även tidigare resultat visat. Den negativa effekten som värmebehandlingen ger upphov till visar sig efter 40 meter för alla prov utom för prov tagna från band A.



Figur 24 Brottgränsjämförelse av anlöpningseffekten mellan anlöpta i 560, 600 och 640 °C och mittprov, längsprover



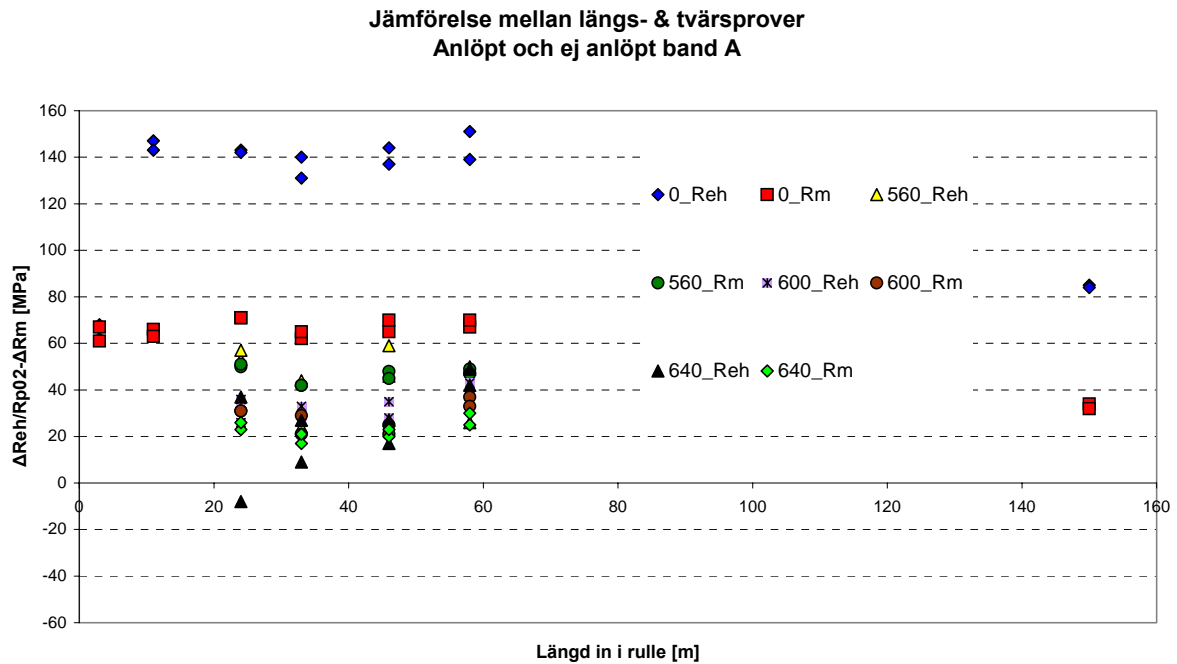
Figur 25 Brottgränsjämförelse av anlöpningseffekten mellan anlöpta i 560, 600 och 640 °C och mittprov, tvärsprover

6.7 Jämförelser mellan längs- och tvärsprover

I Figur 26 visas anlöpningseffekten på brottgräns och sträckgräns för band A. I figuren jämförs förhållandet mellan tvärs och längsprover och anlöpningstemperatur för de olika banden. Om differensen mellan proverna är positiv har tvärsprovet högst hållfasthet och tvärtom.

Resultaten i Figur 26 visar att tvärs- och längsprovets brottgräns och sträckgräns närmar sig efter värmebehandling. Redan vid anlöpning vid 560 °C erhålls en markant sänkning i skillnaden mellan de olika proven. Skillnaden sjunker ju högre temperatur anlöpningen har skett i.

Liknande undersökningar på andra band visar ej denna effekt. Den enda effekten som erhålles är skillnaden i Reh mellan oanlöpta och anlöpta prover.



Figur 26 Jämförelse mellan längs och tvärsprov, anlöp och oanlöp prov

6.8 Skillnader i hållfasthet över bandbredden

Provläge ett och två, Figur 5, är urtagna ca 20 cm in för att undvika att kantdroppet i hållfasthet ska påverka resultaten. Vid undersökningarna visade det sig att variationen i hållfasthet över bandbredden är näst intill obefintlig.

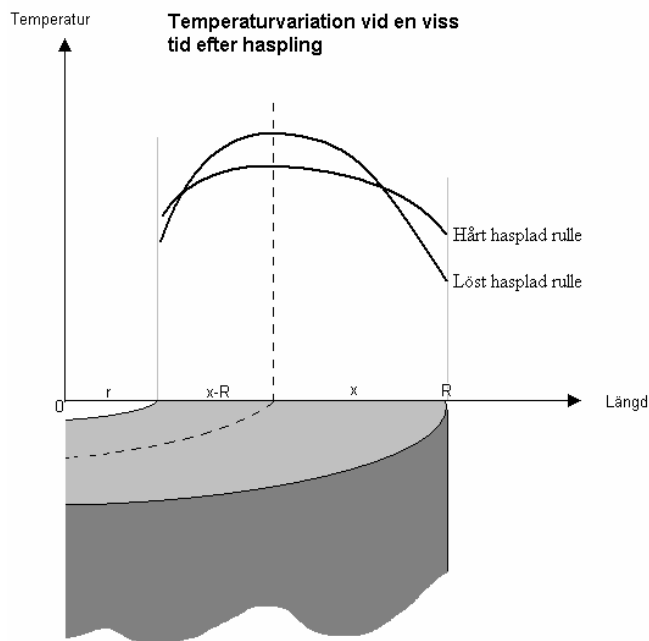
I Figur 5 kan man se att provläge 8 tvärs bandbredden (dragriktningen längs bandet) hamnar nästan mitt i bandet beroende på bandets färdiga bredd medan provläge 1 alltid svarar för ca. 22 cm in i bandet.

Resultatet visar på små variationer i brotthållfasthet på längsproverna. Tvärsproverna är ointressanta då de endast ger en uppfattning hur hållfastheten varierar längs bandlängden på väldigt små avstånd. Som mest skiljer det 15 MPa mellan de olika proven för längsproverna. De små variationerna i hållfasthet över bandbredden visar att jämförelse mellan de olika provlägena kan genomföras trots att proverna inte exakt är klippta på samma ställe.

7 Diskussion

Analyser från de undersökta banden visar att ändeffektens utbredning är betydligt större än vad som visats i tidigare undersökningar [1,2] ca 60 meter in i bandet. Den individuella skillnaden är däremot stor och sträcker sig alltifrån 20 meter till 80-90 meter. En trolig orsak till de stora skillnaderna mellan ändeffektens utbredning är skillnader i svalningshastigheter mellan rullarna. En löst hasplad rulle bör ha en kraftigare temperaturgradient mellan varven medan en tät borde ha en mer homogen svalning, vilket illustreras i Figur 27. Detta därför att värmeöverföringen mellan varven i en tät hasplad rulle borde vara större då kontaktarean mellan varven blir större. En löst hasplad rulle har i stället mer isolerande lager mellan varven vilket torde leda till ett lägre värmeutbyte mellan lagren. Fler av de yttre varven får då en snabb avkylning eftersom värmets inte sprider sig lika snabbt inifrån rullen.

Ett tjockt band borde samtidigt ha en lägre gradient eftersom den har färre isolerande lager än ett tunt band. Detta kan dock motverkas av att de tjockare banden är svårare att haspla tätt, vilket även har visats i en tidigare undersökning [20]. I den här undersökningen kan man inte urskilja någon generell skillnad mellan tjocka och tunna band, vilket alltså kan förklaras av att effekterna motverkar varandra.



Figur 27 Schematisk figur över temperaturvariationer

Då banddraget mm i hasplingen påverkar avsvälningshastigheten för de yttre banden, kan det tänkas att ändeffektutbredningen är beroende på vilken av de två hasplarna som använts för bandet. Undersökningen visar dock att det är svårt att dra några konkreta slutsatser av detta annat än att det finns en svag antydning att ändeffekten kan vara kortare på haspel 3 än haspel 2.

Vid en första anblick kan det tyckas att spridningen är större för band från haspel 2. Det är dock i stort sett enbart ett av banden (H) som ger upphov till detta. En annan aspekt som bör påpekas vid jämförelse av spridningen är att det enbart är i haspel 3 som 8 mm

band hasplas. För att kunna dra statistiskt säkra slutsatser i frågan bör fler band undersökas.

Då ändeffekten är starkt beroende av avsvalningshastigheten bör det även finnas en koppling till bandrullens storlek då små rullar dels har ett lägre totalt värmeinnehåll och dessutom en större mantelyta per volym. En tidigare undersökning har visat att detta verkligen kan påverka ändeffekten och att kortare band även har en kortare ändeffekt [1].

Bland de undersökta banden finns två band, A och H, som är ungefär hälften så långa som de andra 3 mm banden. Band H har följaktligen en väldigt kort ändeffekt. Däremot har det andra av de kortare banden, A, samtidigt en av de längsta ändeffekterna. En rimlig förklaring till detta är att band A har hasplats med ett annat banddrag och att effekten av detta, som det beskrivs ovan, är starkare än effekten av bandlängd.

Vidare visar dragprovkurvorna av oanlöpta prover tagna i längsriktningen en hög sträckgräns för tre band efter 3 meter. De proven är utklippta i coilsfärdigställningen utan riktningsförfarande. De övriga proven är utklippta i en formatsträcka där riktning skett innan proverna tagits. Vid riktningen passerar flytområdet på längsproverna eftersom deformationen är tillräckligt stor. Den höga sträckgränsen på 3-metersproverna är ett resultat av att banden har en övre sträckgräns och inte Rp02 som de andra längsproverna för de oanlöpta banden såsom beskrivet i kapitel 5.4. Riktverket deformerar även plåten i tvärsriktningen, dock ej lika påtaglig, och vissa prov tappar även där sitt flytområde.

Generellt gäller att brottgränskurvorna för prov uttagna i tvärriktningen har samma utseende som i längsled förutom att de visar en högre hållfasthet med en brottgräns på 847-883 MPa mot 815-855 MPa för mittproverna. Spridningen i brottgräns längs de undersökta områdena är dessutom något mindre än för längsproverna såtillvida att det inte finns något band som skiljer sig i resultat från de andra banden. Skillnaden i brottgräns mellan längsprover och tvärsprover är huvudsakligen en mikrostruktureffekt, beroende på att valsningen sker i längsriktningen.

Jämförs istället sträckgränsen är skillnaderna större vilket beror på att flera av tvärsproverna uppvisar ett flytområde då riktningen i tvärsled är mindre än i längsled. Detta innebär även att det inte går att dra några konkreta slutsatser från sträckgränskurvorna, eftersom det inte går att jämföra Reh mot Rp02.

Syftet med den värmebehandlingsundersökning som genomfördes var att utreda hur ändeffekterna varierar efter en anlöpning i det temperaturområde som banden hasplas. Genom att utföra värmebehandling kan ett långsammare svalningsförlopp på de yttre varven simuleras i stället för att utföra försöken genom att prova med olika kylstrategier i kylsträckan.

Resultaten från värmebehandlingen visar att redan vid den lägsta anlöpningstemperaturen påverkas de prover som har den lägsta hållfastheten, d.v.s. 3-metersproverna och de prov från band A som har en låg hållfasthet i oanlöst tillstånd. Eftersom inga tydliga tecken finns på att det bandet hasplats vid för låg temperatur måste hasplingen i sig leda till att temperaturen sänks i de yttersta varven av andra anledningar. Troligtvis har banddragat varit lågt över de sista 30-40 metrarna vilket i sin tur har lett till en snabb svalning i de yttre varven av den hasplade rullen. Men det kan även bero på att bandet har hasplats för hårt eftersom ändeffekten är lång för det aktuella bandet. Som tidigare diskuterats får en

hårt hasplad rulle en längre ändeffekt på grund av att den snabba avsvälningen, vilket leder till den lägre hållfastheten, påverkar fler bandlager in i rullen.

Om anlöpningstemperaturen ökas ytterligare till 600 °C, vilket är samma som hasplingstemperaturen, blir effekterna stora och de prover som har en låg hållfasthet, i oanlöst tillstånd, får en betydligt större ökning i hållfasthet än vid den lägre anlöpningstemperaturen. Ändeffektens utbredning minskar till runt 30 meter för de anlöpta banden vilket ska jämföras med ett intervall från 20 till 90 meter för de oanlöpta rullarna.

Alltså skulle en stor minskning av ändeffekten kunna erhållas om temperaturen på yttre varven kunde hållas konstant vid 600 °C i en halvtimme efter hasplingen. Ökar anlöpningstemperaturen ytterligare finns det inga ändeffekter kvar på banden.

Resultaten visar också att alla prov tenderar, redan vid 560°C, att gå emot ett specifikt värde under de oanlöpta mittprovets brotthållfasthet. Dessutom sker en minskning i brotthållfasthet för prov längre in i bandet. Minskningen är så låg (10-20 MPa) att det är svårt att dra slutsatser om ursprunget till detta. En möjlig förklaring skulle kunna vara att det kan vara att värmebehandlingen har orsakat en partikelförgrovnig, över den optimala, vilket resulterar i en sänkning av hållfastheten.

Jämfört med mittproverna, sker det inte någon ökning av brotthållfastheten efter värmebehandling. Det tyder på att det inte finns något att vinna i hållfasthet över hela bandlängden genom att haspla banden vid en högre temperatur. Det är snarare tvärt om då den högsta hållfastheten längs banden tycks minska något efter värmebehandlingen.

Skillnaden i hållfasthet mellan tvärs- och längsprover verkar vara bestående efter värmebehandlingen. Skillnaden bara ändras marginellt hos de flesta undersökta band. Dock finns ett svårförklarligt exempel som visar motsatsen, Figur 26. De andra banden uppvisade ingen minskning mellan längs- och tvärsproverna. Slutsatserna av denna undersökning är att texturskillnaderna består efter värmebehandlingen och därigenom även skillnaden i brottgräns.

De prover, vid 3 meter, som tagits för band D påverkas inte av värmebehandlingen, varken i jämförelse mellan sträckgräns och brottgräns. Den återfår inte heller sitt flytområde och har därför uteslutits ur resultaten för ändeffekten. Anledningen till att den inte påverkas tillskrivs en misslyckad värmebehandling.

8 Slutsatser

Generellt sett sträcker sig ändeffekten ca. 60 meter in i materialet vilket är längre än vad tidigare resultat visat. Den individuella skillnaden på ändeffekten mellan banden är stor, från 20 till 90 meter, troligen beroende på skillnader i hasplingen av de yttersta varven.

Resultaten visar att skillnaden i spridning i hållfasthet mellan hasplarna är små.

Hållfastheten är generellt större vid för tvärs- än längsprover med en brotthållfasthet i bandmitt som uppmätts till 847-883 MPa i tvärsriktning och 815-855 MPa i längsriktning, på grund av deformationsskillnader vid varmvalsningen.

Jämförelse mellan de två olika bandtjocklekarna, 3 och 8 mm, visar ingen tydlig tjockleksberoende skillnad på ändeffektens utbredning.

Hållfasthetsvariationer över bandlängden som tillskrivs skenmärken finns enbart på ett hållfasthetsprov.

Den lägsta anlöpningstemperaturen påverkar endast prov tagna vid bandände samt prov med lägre hållfasthet i oanlöpt tillstånd. En ökad anlöpningstemperatur ger större påverkan och efter anlöpning vid 640 °C finns det inga spår kvar av den tidigare observerade ändeffekten.

Resultaten från värmebehandlingarna tyder på att det inte finns något att vinna i hållfasthet över hela bandlängden genom att haspla banden vid en högre temperatur. Det är snarare tvärt om då den högsta hållfastheten längs banden tycks minska något efter värmebehandlingen.

9 Fortsatt arbete

Fler hållfasthetsprover bör genomföras för att statistiskt säkerhetsställa variationerna mellan ändeffekternas längd. Dragproverna kan utföras annorlunda med en konstant töjningshastighet för att utvärdera flytområdet och därigenom få ett mått på hur mycket sträckgränsen kan ökas genom värmebehandlingen. Mer prover bör värmebehandlas för att även här få mer underlag för slutsatser.

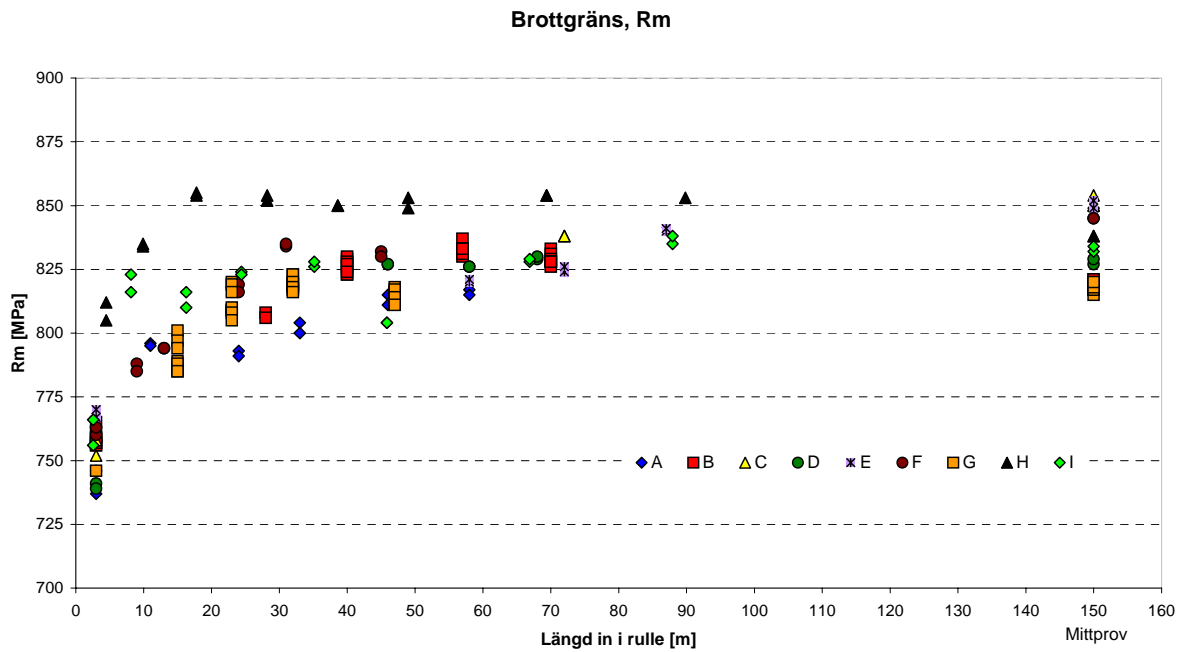
En viktig aspekt är svalningshastigheten på rullarna efter hasplingen. Det kan vara möjligt att förändra kylstrategier för att minska kylhastigheten på yttre varven. Dessutom pågår det arbete med att fastställa svalningshastigheten av rullar för olika tjocklekar, vilket kan ge nya infallsvinklar till problematiken.

10 Referenser

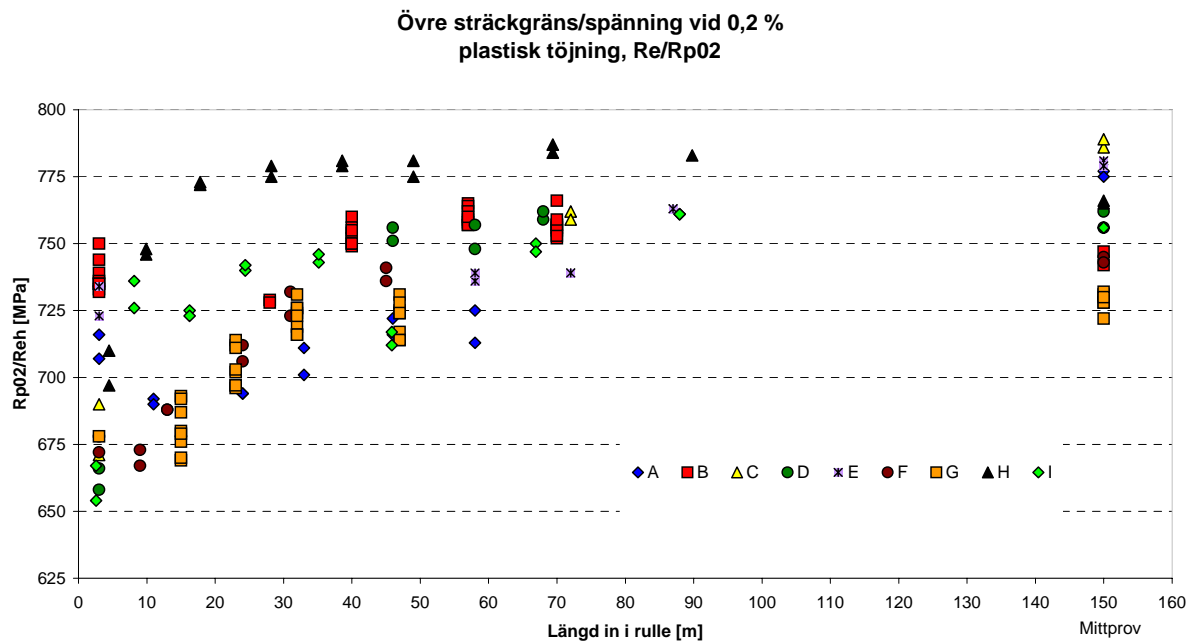
- ¹ Lissel L., Hållfasthet i bandändar för stålsort DX700MC, Högskolan Dalarna, Borlänge, 2003
- ² Andresen V., Hållfasthetsvariationer och ändeffekter på varmvalsade EHS-material, SSAB Tunnbrå AB, 2001
- ³ Materials mekaniska egenskaper, KTH, FKH-24,2001.
- ⁴ Hong S.G., Jun H.J., Kang K.B., Park C.G., Evolution of precipitates in the Nb-Ti-V microalloyed HSLA steels during reheating, Scripta Materialia 48 (2003), 1201-1206.
- ⁵ Hong S.G., Kang K.B., Park C.G., Strain-induced precipitation of NbC in Nb and Nb-Ti microalloyed HSLA steels, Scripta Materialia 46 (2002) 163-168
- ⁶ Irvine K.J., Pickering F.B., Gladman T., J Iron Inst 1967;205:161.
- ⁷ Hong S.G., Kang K.B., Park C.G., Scripta Mater 2002;46:163.
- ⁸ Muntligt, Tågtström P., SSAB Tunnbrå AB Borlänge.
- ⁹ Materials mekaniska egenskaper, KTH, FKH-27,2001.
- ¹⁰ Petterson K., Materialvetenskapens grunder, HÅR 7, Stockholm, 2002
- ¹¹ Engberg G., Materialbeteende vid plastisk formning av metaller. 2003-12-19, s64.
- ¹² Hillert M., Materials fasomvandlingar del 2, KS 8, Stockholm, 2002
- ¹³ Hou, H. ; Chen, Q. ; Liu, Q. ; Dong, H. Grain refinement of a Nb-Ti microalloyed steel through heavy deformation controlled cooling, Journal of Materials Processing Technology 137 (2003) 173-176
- ¹⁴ Torizuka S., Umezawa O., Tsuzaki K., Nagai K., Mater. Sci. Forum 284-286 (1998) 225-230.
- ¹⁵ Beynon V., Gloss R., Hodgson P.D., Mater. Forum 16 (1992) 37-42.
- ¹⁶ Hodgson P.D., Hickson M.R., Gibbs V, Mater. Sci. Forum 284-286 (1998) 63-72.
- ¹⁷ Matsumura Y., Yada V, Trans. ISIJ 27 (1987) 492-498.
- ¹⁸ Materials mekaniska egenskaper, KTH, FKH-21,2001.
- ¹⁹ Engberg G., Materialbeteende vid plastisk formning av metaller. 2003-12-19, s54.
- ²⁰ Lundberg N., The cooling process of coils after the hot strip mill, Umeå universitet, Umeå, 2001
- ²¹ Materials mekaniska egenskaper, KTH, PDMa-7, 2001
- ²² Mekanisk metallografi, VII Deformationsåldring DÅ-4, VT 2004, 1998

11 Bilagor

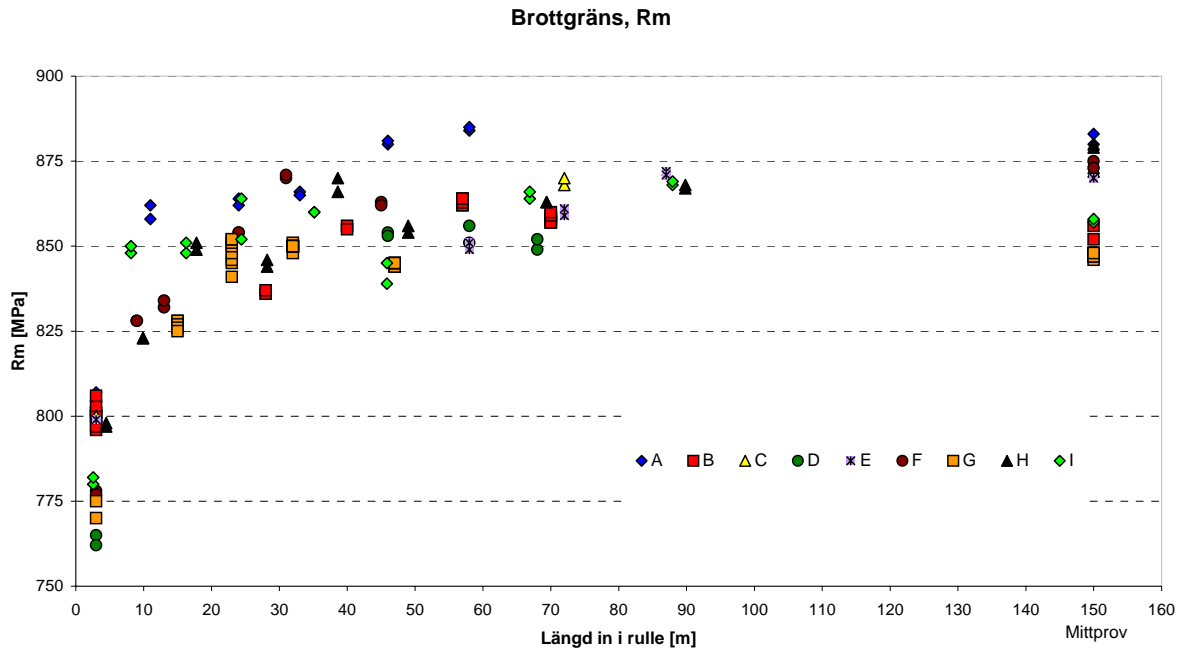
11.1 Bilaga 1 Samtliga hållfasthetsresultat för oanlöpta prover



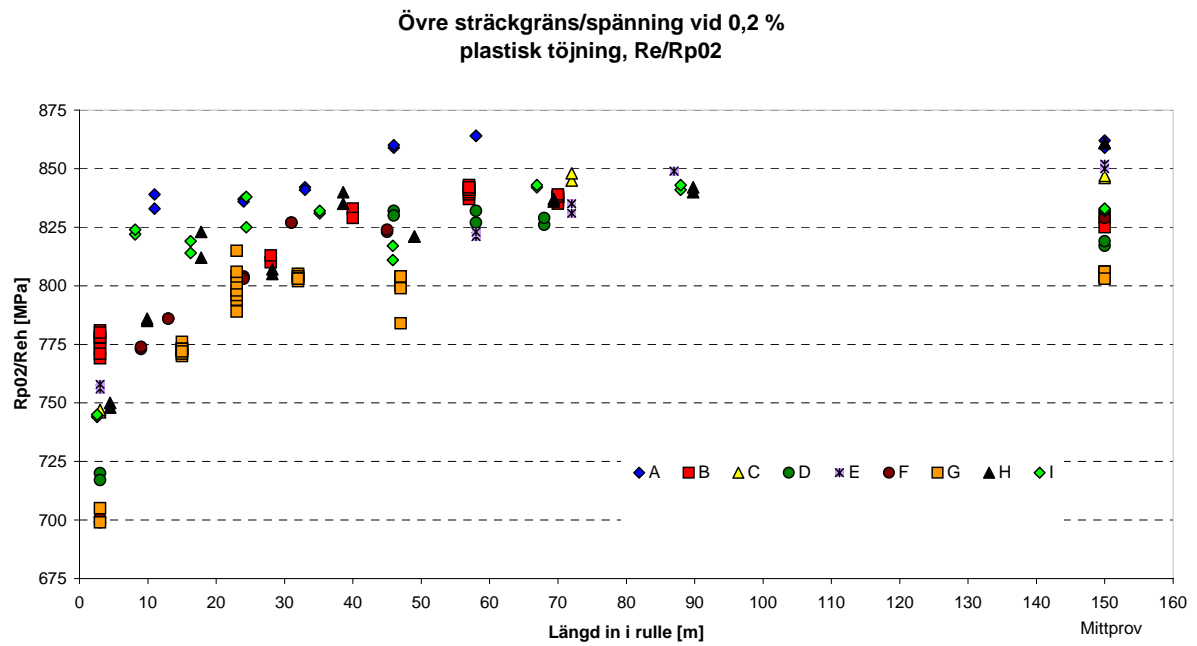
Figur 28 Obehandlade längsprover, brottgräns



Figur 29 Obehandlade längsprover, övre sträckgräns/Rp02

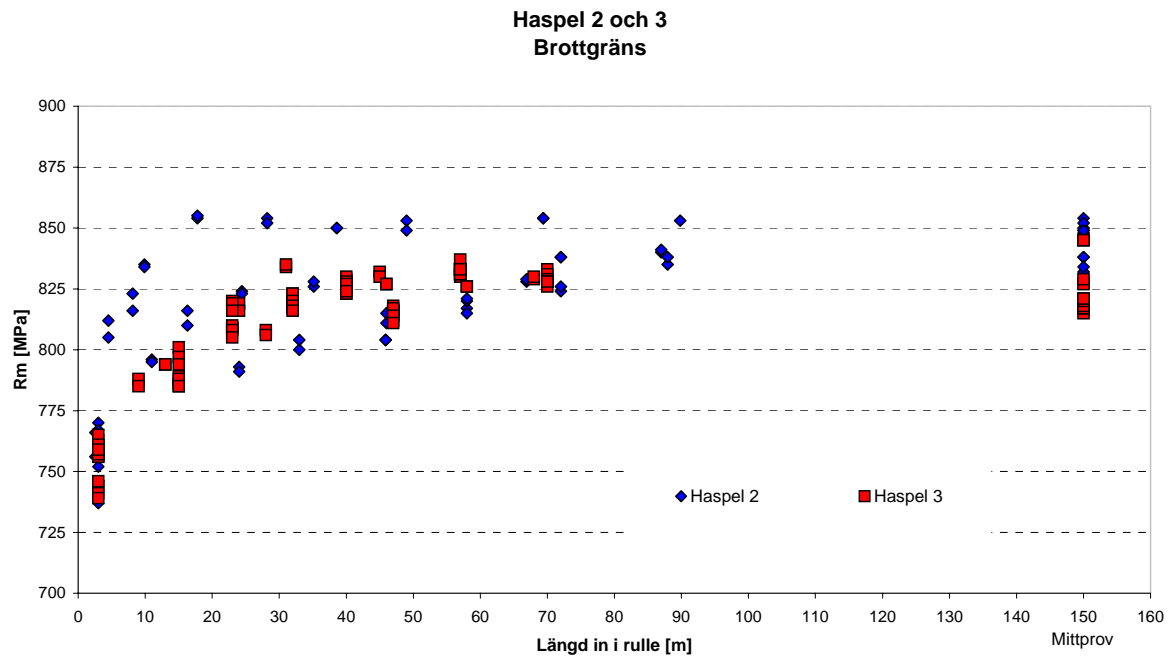


Figur 30 Obehandlade tvärsprover, brottgräns

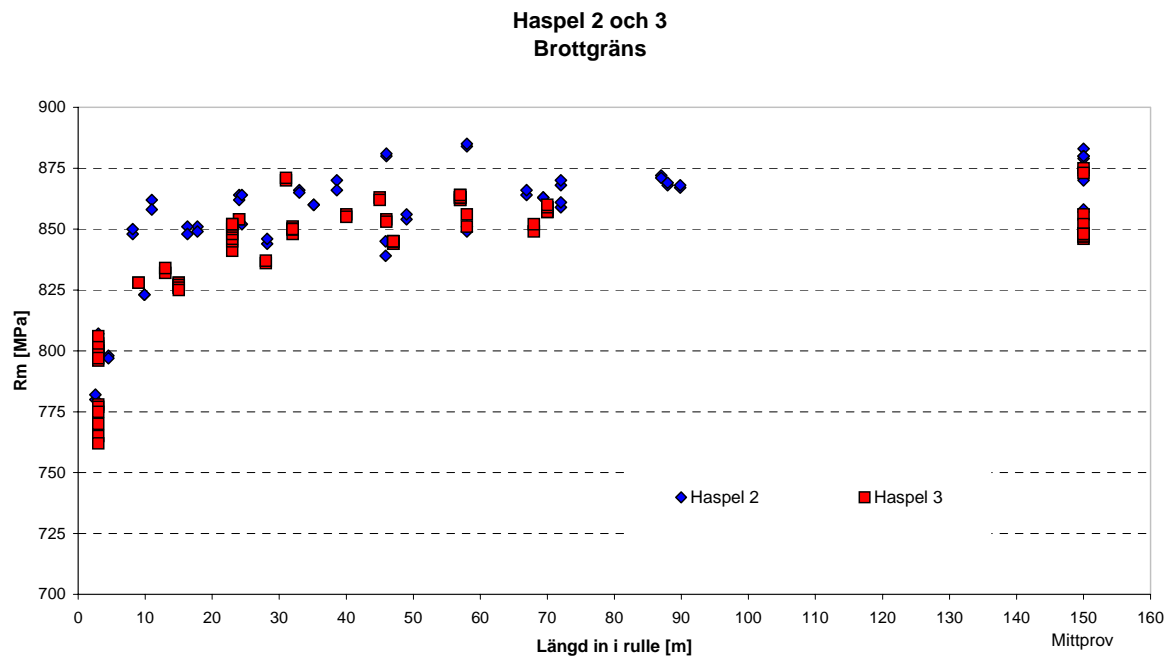


Figur 31 Obehandlade tvärsprover, övre sträckgräns/Rp02

10.1 Bilaga 2 spridning på obehandlade prov, haspelvis



Figur 32 Haspelvis spridning på brottgräns för längsprover



Figur 33 Haspelvis spridning på brottgräns för tvärprover

11.3 Bilaga 3 Kurvanpassning

Passning av sigmoid mot $Rp_{0,2}$ (Re_h) och Rm

för
bandändar

Läs matris med värden

M := READ_EXCEL_FILE

M =

	0	1	2
0	"A"	3	707
1	"A"	3	716
2	"A"	11	692
3	"A"	11	690
4	"A"	24	694
5	"A"	24	694
6	"A"	33	711
7	"A"	33	701
8	"A"	46	722

Hitta index för resp. rulle i indatafilen/matrisen.

```
GetIndex(m) := | n ← last(m<0>)
                | Index_0 ← -1
                | j ← 1
                | for i ∈ 1..n
                |   if m_{i,0} ≠ m_{i-1,0}
                |     | Index_j ← i - 1
                |     | j ← j + 1
                |   Index_j ← n
                | Index

I := GetIndex(M)
N_band := last(I)
N_band = 9
```

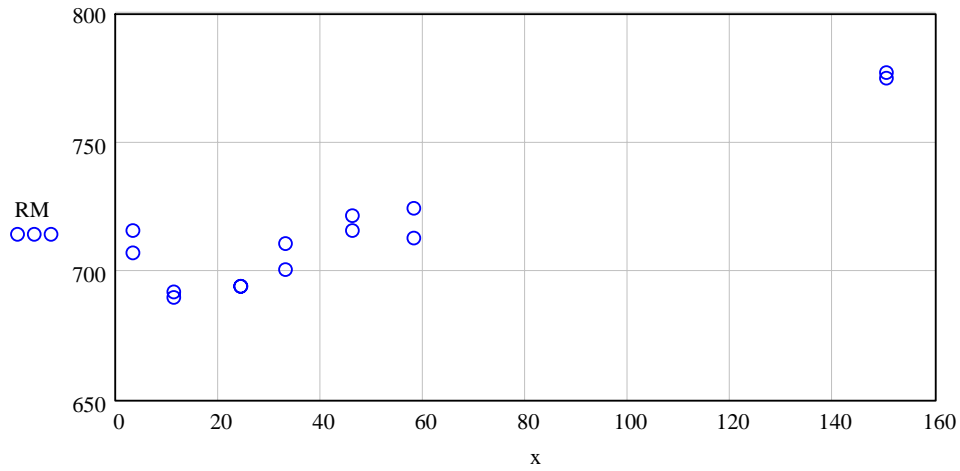
Valt band: band = 0 (ligger i en global variabel som sätts längst ned i arket)

```
i_start := I_band + 1    i_slut := I_band+1    i_start = 0
i_slut = 13
```

Extrahera data

```
x := submatrix(M, i_start, i_slut, 1, 1)    RulleId := M_{i_start, 0}    RulleId = "A"
RM := submatrix(M, i_start, i_slut, 2, 2)
```

Uppmätta värden för valt band



Grundfunktionen är en sigmoid som valts för sin S-form och asymptotiska egenskaper. Termen a motsvarar kurvans asymptot. Exponenten c beskriver hur tvärt kurvan stiger.

Funktion samt partiella derivatorer för resp. obekant koefficient.

$$F(x, a, b, c) = a + \frac{b}{1 + e^{-x^c}}$$

$$\frac{d}{da} F(x, a, b, c) = 1$$

$$\frac{d}{db} F(x, a, b, c) = \frac{1}{1 + \exp(-x^c)}$$

$$\frac{d}{dc} F(x, a, b, c) = \frac{-b}{(1 + \exp(-x^c))^2} \cdot x^c \cdot \ln(x) \cdot \exp(-x^c)$$

Mathcad vill ha följande vektor med funktion plus partiella derivatorer för resp. obekant koefficient

$$F(x, u) := \begin{bmatrix} u_0 + \frac{u_1}{1 + e^{-x^{u_2}}} \\ 1 \\ \frac{1}{(1 + \exp(-x^{u_2}))} \\ \frac{-u_1}{(1 + \exp(-x^{u_2}))^2} \cdot x^{u_2} \cdot \ln(x) \cdot \exp(-x^{u_2}) \end{bmatrix}$$

Startgissning

$$g := \begin{pmatrix} 1000 \\ -500 \\ 0.5 \end{pmatrix}$$

Utför kurvpassningen med minsta kvadratmetoden

Koefficienterna hamnar i vektorn P.
Lägg de nya värdena i gissningsvektorn också.

$$P := \text{genfit}(x, RM, g, F) \quad P = \begin{pmatrix} 883.663 \\ -796.894 \\ 0.085 \end{pmatrix}$$

$$g := P$$

$$\begin{pmatrix} 980.468 \\ -961.217 \\ 0.117 \end{pmatrix}$$

Skapa lägesvektor för passningen

$$N := 50 \quad i := 0..N - 1$$

$$p_i := \frac{\max(x) - \min(x)}{N - 1} \cdot i + \min(x)$$

Beräkna funktionen

Välj band (0..N_{band}-1): N_{band} = 9

$$F(x) := g_0 + \frac{g_1}{1 + e^{\frac{g_2}{x}}} \quad f_i := F(p_i)$$

band ≡ 0

Plotta uppmätta värden mot passning

