



EXAMENSARBETE
STOCKHOLM 2016

Förutsättningar för ökad metervikt och axellast på Malmbanan

ANTON DAHLBERG
LUDVIG JANGENSTÅL



Förutsättningar för ökad metervikt och axellast på Malmbanan

Examensarbete

Anton Dahlberg

Ludvig Jangestål

Stockholm, December 2015

Järnvägsgruppen vid Kungliga Tekniska högskolan
Avdelningen för Transportplanering, ekonomi och teknik

FÖRORD

Detta examensarbete är utfört på *Avdelningen för Transportplanering, Ekonomi och Teknik* på *Kungliga Tekniska Högskolan*. Examensarbetet är avslutningen på vår civilingenjörsutbildning inom *Teknisk Fysik* med inriktning *Spårfordonsteknik*, och omfattar 30 högskolepoäng. Arbetet är utfört i samarbete med *Sweco Rail* i Luleå, och pågick under hösten 2015.

I rapporten har Anton Dahlberg ansvarat för rälsbefästningar samt olika komponenter i banunderbyggnaden såsom geoteknik, broar och trummor. Ludvig Jangénstål har ansvarat för de olika komponenterna i banöverbyggnaden, såsom rälen, sliprar och ballast. På samtliga bankomponenter har ett samarbete skett, men det slutliga ansvaret legat på personen som angivits ovan.

Vi vill ta tillfället i akt att tacka de personer som gjorde detta arbete möjligt. Ett stort tack till vår handledare *Anders Wahlberg* på *Sweco Rail* för god vägledning genom projektet. Vi vill även tacka *Stefan Kallander* på *Trafikverket*, som har besvarat diverse frågeställningar som tillkommit under arbetes gång.

Slutligen vill vi tacka vår handledare *Anders Lindahl* på *KTH* för hjälp med utformning, problemuppställning och granskning av arbetet. Tack även till *Hans E Boysen* som bidragit med fördjupade kunskaper om ämnet.

Stockholm, December 2015


Anton Dahlberg


Ludvig Jangénstål

SAMMANFATTNING

LKAB avser att utöka sin malmproduktion de kommande åren. För att förhindra kapacitetsproblem längs Malmbanan utreds i ett första steg möjligheten att den *största tillåtna axellasten* höjs från dagens STAX 30 till STAX 32,5. Framtidsvisionen är att axellasten ökas ytterligare (steg om STAX 32,5 - 35 - 37,5 - 40), med ett slutmål på STAX 40. Denna rapport behandlar påverkan på bankkomponenter vid respektive axellastökning. Detta i syfte att påvisa den mer omfattande nedbrytning som sker av bankroppen vid en ökad belastning, samt framföra lämpliga förstärknings- och underhållsåtgärder.

Rapporten fokuserar på helhetsbilden av Malmbanans södra omlopp. Spårförhållanden på enskilda bandelar tas inte i hänsyn. Arbetet omfattar endast banan. Ekonomiska beräkningar på förstärknings- och underhållsåtgärder lämnas till fortsatta utredningar.

Arbetet har inkluderat en *litteraturstudie*, *fältstudie*, *beräkningsstudie* samt en *intervjustudie*. Detta har resulterat i en bedömning av påverkan på respektive bankkomponent vid axellastökningar.

Rälen kommer att utsättas för ett ökat slitage, ökad risk för rälsskador samt plastisk deformation i rälshuvudet. Detta motverkas enklast med rälsslipning samt rälssmörjning i skarpa kurvor. Mer omfattande åtgärder är utbyte mot ett starkare rälstål samt utbyte mot en större rälsprofil.

Rälsbefästningarna kommer att belastas med högre krafter. I skarpa kurvor är befästningssystemen särskilt utsatta. Ett stegvist utbyte av rälsbefästningar kommer vara nödvändigt vid en ökning av den tillåtna axellasten. Detta gäller för samtliga befästningstyper förutom Fastclip och de starkaste e-clips med plastmellanlägg som bedöms duglig för STAX 40.

Sliprarna påverkas främst med en förkortad livslängd. Böjmomentet i rälläget och i slipermitt är dimensionerande vad gäller största tillåtna axellast. Enligt utförda beräkningar bör samtliga slipermodeller, förutom A22, på sikt bytas ut. Dock saknas beräkningsunderlag för vissa av slipermodellerna då hållfasthetsprov ej har genomförts.

En komponentinventering för befästningssystem och sliprar bör utföras för att säkerställa banposition och modell. Detta i syfte att underlätta för framtida uppgraderingar av banöverbyggnaden.

En påskyndad nedkrossning av ballasten kommer att ske. En ballastrening bör därför på sikt utföras i syfte att minska föroreningsgraden. Ballastdjupet bör inte understiga 50 cm, enligt utförda beräkningar.

Underhållsbehovet kommer att öka med en ökad belastning på banunderbyggnaden. Förstärkningsåtgärder kommer troligtvis bli nödvändigt av geotekniken, som främst förstärks genom tryckbankar på banpartier med svag undergrund. En fullständig bärighetsutredning av banundergrunden bör utföras i syfte att finna banpartier med otillräcklig bärighet. En bärighetsutredning bör även utföras för samtliga broar längs Malmbanans södra omlopp. Vid axellasthöjningar kommer förstärkningsåtgärder alternativt utbyte vara nödvändigt på flertalet broar och trummor.

Uppgraderingen av bankomponenterna sker stegvis, i steg om STAX 32,5 - 35 - 37,5 - 40. Vid varje steg i ökningen sker ett utbyte av de bankomponenter som inte uppfyller vad som krävs för den aktuella axellasten. Utbytet sker mot hållfastare bankomponenter, som förslagsvis är dimensionerade för STAX 40.

ABSTRACT

LKAB intends to increase the production of iron ore in the upcoming years. To prevent problems with the capacity along Malmbanan (The Iron Ore Line) an increase in the maximum permissible axle load is required. The first step is an increase from 30 ton to 32.5 ton. The vision is to increase the axle load in 4 steps of 32.5 - 35 - 37.5 – 40 ton, where an axle load of 40 ton is the final goal. The report deals with the influence of an increased axle load for each track component. This is in order to present the deterioration of the track quality when the axle load is increased. Different methods of track maintenance and reinforcements will also be discussed.

The work is focused on the southern circuit of Malmbanan. Track conditions on individual track sections will not be considered. The work only includes the track structure i.e. signaling systems and power supply systems will not be considered. Economical calculations of reinforcement and maintenance activities is left for future investigations.

The working process has included a *literature study*, *field study*, *computational study* and an *interview study*. This has led to an assessment of to what extent each track component is affected by an increase in maximum permissible axle load.

The rail will be exposed to a higher amount of wear, an increased risk for rail defects and plastic deformation of the rail head. Rail damage is most easily prevented by rail grinding and rail lubrication in sharp curves. More extensive measures are to replace the rail with a stronger rail steel or replace with a larger rail profile.

The rail fastenings will be affected by higher track forces and are particularly exposed in sharp curves. The rail fastening systems has to be replaced gradually when increasing the permissible axle load. The only fastening device, in use today, that will be approved for 40 ton axle load is the Fastclip and the strongest e-clips with plastic rail pads.

The lifetime of the sleepers will be shortened with an increased axle load. A critical factor is the bending moment at the position of the rail and in the middle of the sleeper. According to the performed calculations all sleeper models eventually have to be replaced, except sleeper model A22. However, there is a lack of knowledge about the sleeper strength for some models. Strength tests for each specific sleeper model should therefore be carried out.

It is recommended that a research study is performed to gain knowledge about the track position and model for all the fastening systems and sleepers along the track. This in order to ease future track upgrades.

A higher axle load leads to an accelerated deterioration of the ballast. Ballast cleaning is recommended in the near future to reduce the rate of ballast contamination. The ballast thickness should not be less than 50 cm, according to performed calculations.

An increased axle load will cause an increased need for maintenance of the track substructure. Reinforcements have to be carried out on several bridges and culverts. This also applies to the geotechnics, which is mainly reinforced by pressure banks at track sections with poor subgrade. A complete investigation of the bearing capacity of the track subgrade should be performed. This in order to find track sections with insufficient bearing capacity. An investigation of the load carrying capacity for all bridges along the southern circuit of Malmbanan should also be performed.

The track components will be gradually upgraded, in steps of a maximum permissible axle load of 32.5 - 35 - 37.5 - 40 tons. At each step of the increase all the track components that do not meet the requirements will be exchanged to track components with higher strength. These components should preferably be designed for a maximum permissible axle load of 40 tons.

FÖRKORTNINGAR OCH TERMER

AREMA	American Railway Engineering and Maintenance Association
Armerad	Förstärkningsmetod för att öka betongens bärighet genom att sätta in stålstänger
Bankropp	Innefattar <i>banöverbyggnaden</i> och <i>banunderbyggnaden</i>
Banunderbyggnad	Innefattar geoteknik, broar och trummor
Banundergrund	Innefattar det naturliga jord- och bergsammansättning som bär upp bankroppen
Banöverbyggnad	Innefattar rälen, sliprar, befästningar och ballast
BaTMan	Trafikverkets bro- och tunnelförvaltningssystem
BIS	Trafikverkets databas för baninformation
Bomberad	En plan yta som är upphöjd i mitten
Bäddmodul	Förhållandet mellan tryck och deformation
Dynamiskt tillskott	Last som tillkommer vid bland annat spårjämnheter
Effektiva hjullasten	Statiska hjullasten + Kvasistatiska hjullasten + Dynamiska hjullasten
Kapacitet	Antalet tåg som kan framföras per tidsenhet i samma riktning
Kvasistatisk last	Last som tillkommer mot ytterrälen vid kurvtagning
LKAB	Luossavaara-Kiirunavaara Aktiebolag
Makadam	Krossad sten med en kornstorlek på 40 - 80 mm (Används som ballastmaterial)
Moträl	Styrskena som hindrar hjulflänsen att hamna fel vid växelpassage (Fast korsningsspets)
Plastisk deformation	Deformation av farbanan på rälen vid hjulpassage som kvarstår i obelastat tillstånd
RUK	Rälsunderkant
Silt	En finkornig jordart
Skvättsträcka	Sträcka där finmaterial pumpats upp i ballasten från banundergrunden
Slig	Finkornigt koncentrat av malm
Spårledning	Indikerar om ett tåg befinner sig på en bansträcka
STAX	Största tillåtna axellast [ton]
Sträckgräns	Högsta kontaktspänningen rälstålet tål innan plastisk deformation sker
STVM	Största tillåtna vikt per meter [ton/m], $\left(STVM = \frac{\text{Antal hjulaxlar per vagn} * STAX}{\text{Vagnslängden}} \right)$
Trafiklast	Tillkommande last i vertikal riktning på banan vid tågpassage
Tryckbank	En jordbank som byggs upp bredvid banvallen för att förbättra stabiliteten
UIC	International Union of Railways (<i>Fr: Union Internationale des Chemins de fe</i>)
Överfyllnadsdjup	Avstånden mellan trummans hjässa och rälsunderkant
30 ton på Malmbanan	Banverkets omfattande utredning för axellasthöjningen till STAX 30 på Malmbanan

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

FÖRORD	II
SAMMANFATTNING	IV
ABSTRACT	VI
FÖRKORTNINGAR OCH TERMER	VIII
1 INLEDNING	1
1.1 BAKGRUND	1
1.2 SYFTE OCH MÅL	2
1.3 AVGRÄNSNING	2
2 METODBESKRIVNING	3
2.1 LITTERATURSTUDIE	3
2.2 FÄLTSTUDIE.....	3
2.3 BERÄKNINGSSTUDIE.....	3
2.4 INTERVJUSTUDIE	3
3 JÄRNVÄGSSPÅRET	5
3.1 SPÅRUPPBYGGNAD	5
3.2 SPÅRKRAFTER	6
3.3 SPÅRSTYVHET	8
4 MALMBANAN I DAGSLÄGET	9
4.1 BANÖVERBYGGNAD	10
4.1.1 Rälén.....	10
4.1.2 Räl sbefästningar.....	11
4.1.3 Slipers	12
4.1.4 Ballast.....	13
4.2 BANUNDERBYGGNAD.....	14
4.2.1 Geoteknik.....	14
4.2.2 Trummor.....	14
4.2.3 Broar.....	15
5 BANKOMPONENTERNAS PÅVERKAN AV EN AXELLASTÖKNING	16
5.1 RÄLEN.....	16
5.1.1 Prediktering av slitage.....	16
5.1.2 Normalspänning i kontaktytan mellan hjul och räl	17
5.1.3 Skjuvspänning i rälshuvudet.....	18
5.1.4 Böjspänning i räl sfoten.....	20
5.1.5 Rälsskador	23
5.1.6 Rälssvetsning	26
5.1.7 Räl sprofil.....	28
5.1.8 Isolerskarvar	28
5.1.9 Växlar.....	29

5.2	RÄLSBEFÄSTNINGAR	30
5.2.1	<i>Mellanläggsplatta</i>	31
5.2.2	<i>Typ av rälsbefästning</i>	31
5.3	SLIPERS	33
5.3.1	<i>Spänningen i kontaktytan mellan räl och sliper</i>	34
5.3.2	<i>Böjhållfasthet</i>	35
5.3.3	<i>Träslipers</i>	39
5.4	BALLAST	42
5.4.1	<i>Föroreningar och underhåll</i>	42
5.4.2	<i>Slipermattor och ballastmattor</i>	43
5.4.3	<i>Trycket i kontaktytan mellan sliper och ballast</i>	44
5.4.4	<i>Ballastdjupet</i>	45
5.4.5	<i>Underballast</i>	48
5.4.6	<i>Frostisolering</i>	48
5.5	BANUNDERBYGGNAD.....	49
5.5.1	<i>Geoteknik</i>	49
5.5.2	<i>Trummor</i>	53
5.5.3	<i>Broar</i>	55
6	NÖDVÄNDIGA ÅTGÄRDER	62
6.1	RÄLEN.....	62
6.2	RÄLSBEFÄSTNINGAR	63
6.3	SLIPRAR.....	64
6.4	BALLAST	64
6.5	BANUNDERBYGGNAD.....	65
6.5.1	<i>Geoteknik</i>	65
6.5.2	<i>Trummor</i>	65
6.5.3	<i>Broar</i>	66
7	SLUTSATSER OCH REKOMMENDATIONER	67
7.1	RÄLEN.....	67
7.2	RÄLSBEFÄSTNINGAR	67
7.3	SLIPRAR.....	68
7.4	BALLAST	68
7.5	BANUNDERBYGGNAD.....	68
8	FORTSATT ARBETE	70
9	BILAGOR.....	71
9.1	BILAGA 1 - BERÄKNING AV NORMALSPÄNNINGEN I KONTAKTYTAN MELLAN HJUL OCH RÄL FÖR STAX 30 ..	71
9.2	BILAGA 2 - BERÄKNING AV MAXIMALA BÖJSPÄNNINGEN I RÄLSFOTEN FÖR STAX 30	72
9.3	BILAGA 3 - BERÄKNING AV KONTAKTSPÄNNINGEN MELLAN RÄLSFOT OCH SLIPER PÅ BETONGSLIPERS AV TYPEN S7 FÖR STAX 30.....	72
9.4	BILAGA 4 - BERÄKNING AV BÖJMOMENTET I RÄLLÄGET OCH SLIPERMITT FÖR STAX 30	73
9.5	BILAGA 5 - BERÄKNING AV KONTAKTSPÄNNINGEN MELLAN UNDERLÄGGSPLATTAN OCH TRÄSLIPERN FÖR STAX 30.....	73
9.6	BILAGA 6 - BERÄKNING AV TRYCKET I KONTAKTYTAN MELLAN SLIPERS OCH BALLAST FÖR STAX 30.....	73
9.7	BILAGA 7 - ISOLERSKARVAR LÄNGS MALMBANANS SÖDRA OMLOPP	74

9.8	BILAGA 8 - STABILITETSBERÄKNINGAR UTFÖRDA FÖR PILOTPROJEKTET FÖR STAX 32,5 OCH GENOMFÖRDA STABILITETSÅTGÄRDER SEDAN 30 TON PÅ MALMBANAN	74
9.9	BILAGA 9 - KURVRADIER FÖR RESPEKTIVE BANDEL LÄNGS MALMBANANS SÖDRA OMLOPP	76
10	REFERENSER	78

1 INLEDNING

1.1 BAKGRUND

LKAB avser att inom de kommande åren öka sin malmproduktion för att uppnå sina produktionsmål. Detta innebär att mer malm måste fraktas från gruvorna ut till hamnarna. En ökning av största tillåtna axellast (STAX) och meterlast (STVM) är en möjlig lösning, som ska kunna förverkligas inom en snar framtid.

Det första steget är att implementera en ökning av axellasten från STAX 30 (STVM 12) till STAX 32,5 (STVM 13). Detta medför att mer malm kan fraktas utan att kapaciteten, som redan i dagsläget är ansträngd på Malmbanan, sänks ytterligare.

Ett pilotprojekt mellan LKAB och Trafikverket har påbörjats, där avsikten är att få Malmbanan godkänd för tågdrift med en axellast på maximalt STAX 32,5 (STVM 13). I arbetet har Sweco Rail i Luleå bistått med beräkningar och analyser.

Varje dag trafikerar det södra omloppet på Malmbanan med ett tåg per dygn med axellasten 32,5 ton. Projektet påbörjades i slutet av augusti 2015 och kommer att pågå ett år framöver. Därefter kommer en utvärdering att ske på ökat slitage, nedbrytning och underhållsbehov av bankroppen. Innan pilotprojektet påbörjades utfördes en bärighetsberäkning av samtliga broar längs det södra omloppet, dock glömdes brostöden bort vilket försenade trafikstart med drygt ett år. Innan trafikstarten utfördes även stabilitetsåtgärder på myrpartier med oroligt spårsläge samt förstärkning av ett antal trummor. [1]

Den senaste permanenta axellastökningen skedde i slutet av 1990-talet när axellasten ökades från STAX 25 till STAX 30. Dock förändrades inte metervikten som kvarstod på STVM 12. Den totala tågvikten blev däremot avsevärt högre på grund av att tåglängden ökade markant. Från denna axellastökning kan en del erfarenheter inhämtas, såsom att många broar behövde bytas ut och förstärkas. Dessutom uppstod ett större underhållsbehov av bankroppen, som bland annat slipning/fräsning av rälen, ballastrening samt förlängning och stabilisering av stentrummor. Vidare behövde ett antal bankomponenter åtgärdas, exempelvis spårbyte på 50 kg/m räl, 1:9 växlar i normalhuvudspår byttes till 1:15 växlar med rörlig korsningsspets, utbyte mot starkare rälsbefästningar i snäva kurvor. Slutligen ökade även problemen på sträckor med oroligt spårsläge och skvättsträckor, vilka förstärktes med tryckbankar, utgrävningar och markförstärkningsåtgärder. [1]

Generellt sker följande effekter vid en ökad axellast. [1]

- Mer omfattande slitage på isolerskarvar och växlar, främst i växelkorsningar.
- Högre risk för jord- och bergskred.
- Större rörelser i ballasten kan initiera en pumpeffekt, vilket får finmaterial att vandra uppåt och beblanda sig med ballasten. Dessa partier benämns *skvättsträckor*.
- Utmattningsrisk för broar, vilket resulterar i en kortare livslängd. Dessutom ökar risken för sättningar i brostöden.
- Ökning av slitageskador på rälen i form av ytskador och sprickbildningar.
- Större påfrestning på befästningar och mellanlägg, främst i snäva kurvor.

En ökad meterlast orsakar generellt följande. [1]

- Ökad risk för sättningar i bankroppen
- Påskyndad nedkrossning av makadam, särskilt på sträckor med en ballasttjocklek mindre än 30 cm.
- Ökad risk för berg- och jordskred.
- Ökad risk för oroligt spårläge.

1.2 SYFTE OCH MÅL

Syftet med föreliggande rapport är att studera påverkan på samtliga bankomponenter vid en axellastökning. Nödvändiga banåtgärder för stegvisa axellastökningar om STAX (32,5 - 35 - 37,5 - 40) kommer att diskuteras.

Målet är att framföra behovet av åtgärder, förstärkningar och underhåll på bankroppen för att en potentiell ökning av STAX/STVM ska vara genomförbar, och när en sådan ökning sker ska underlag finnas för att underlätta nästa steg av ökningen.

1.3 AVGRÄNSNING

För att motsvara omfattningen av ett examensarbete har en rad avgränsningar gjorts. Dessa har tillkommit både från rekommendationer av uppdragsgivaren samt författarna av rapporten. Avgränsningarna presenteras nedan i punktform.

- Ingen hänsyn tas till ekonomiska aspekter för nödvändiga åtgärder.
- Endast Malmbanans södra omlopp dvs. Koskullskulle till Luleå kommer att beaktas.
- Arbetet omfattar inte nödvändiga åtgärder för axellastökningar på lok, vagnar etc.
- Arbetet omfattar endast banan. Påverkan och åtgärder på signalsystem och kraftförsörjningssystem behandlas inte.
- Antagandet görs att Malmbanan har goda spårförhållanden i dagsläget.
- Malmbanan åskådas från ett helikopterperspektiv. Spårförhållanden på enskilda bansträckor behandlas inte. Arbetet koncentrerar på helhetsbilden.
- Rapporten behandlar endast spårkrafter för lastade malmvagnar. Spårkrafterna för loken behandlas ej. Det nuvarande IORE-loket skiljer sig från malmvagnarna med en större hjulradie, längre hjulbas och högre ofjädrad massa.

2 METODBESKRIVNING

Arbetet har inkluderat en *litteraturstudie*, *fältstudie*, *beräkningsstudie* samt en *intervjustudie*. Samtliga studier har visat sig nödvändiga för att uppnå rapportens målsättning. Arbetet påbörjades med att inhämta information från rapporter och böcker, för att erhålla en grundläggande kunskap om ämnet. Kunskaperna kunde därefter appliceras specifikt på Malmbanan, där en beräkningsstudie utfördes för att undersöka påverkan på Malmbanans bankomponenter vid en axellastökning. Ytterligare kunskap erhöles från en fältstudie, där utvalda bansträckor på Malmbanan inspekterades med handledning av Anders Wahlberg på Sweco Rail Luleå. Dessutom utfördes en intervjustudie, där ett antal personer intervjuades på *Trafikverket*, *Sweco* samt *KTH*. Samtliga studier har pågått simultant under arbetets gång.

2.1 LITTERATURSTUDIE

I litteraturstudien diskuteras redan publicerat material. Den tillför en stabil bakgrund till en rapport, eftersom en heltäckande bild av undersökningsområdet ofta krävs. I denna rapport används ett antal olika böcker för att erhålla den grundläggande kunskapen, varav de mest utmärkande har varit *Track Compendium* [2] och *Byggande, Drift och Underhåll av Järnvägsbanor* [3]. Dessutom har flertalet forskningsrapporter använts om respektive bankomponent.

2.2 FÄLTSTUDIE

I fältstudien besöktes utvalda bansträckor på Malmbanan. Detta i syftet att erhålla en mer omfattande förståelse om bankomponenternas utseende och samspel. Under dagen besöktes flertalet växlar med både rörlig och fast korsningsspets, varav en som utsatts för ett stort slitage, en tryckbank, en skvättsträcka, Sävast mätsstation, samt LKABs malmhamn i Luleå. Dessutom besöktes Trafikverket och Sweco Rail i Luleå och Boden.

2.3 BERÄKNINGSSTUDIE

Arbetet har inkluderat beräkningar på flertalet komponenter i banöverbyggnaden. Beräkningsmodellerna har inhämtats från litteraturstudien och applicerats på de specifika bankomponenterna på Malmbanan. Modellerna innefattar ofta förenklingar, men ger en bra uppskattning av verkligheten. Resultatet av beräkningarna har varit en avgörande faktor till de nödvändiga åtgärder som rekommenderas i rapportens slutskede.

2.4 INTERVJUSTUDIE

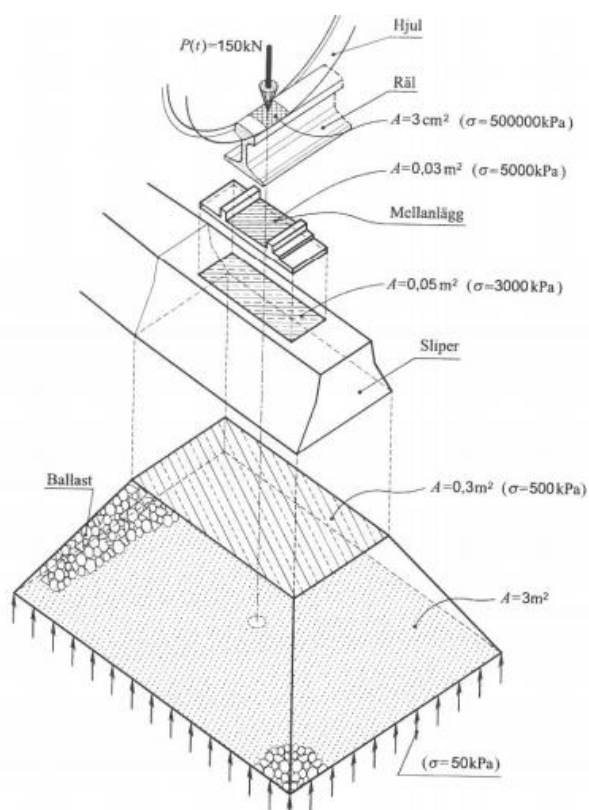
Flertalet personer från Trafikverket, Sweco och KTH har intervjuats. Detta i syftet att ta del av expertis inom ett visst teknikområde. Intervjuerna har berört åtgärder som krävs för en axellasthöjning, grundläggande information, diskussion om tillvägagångssätt för

beräkningsmodellerna, Malmbanans nuvarande banuppbyggnad, framtidsvisioner med mera. Intervjuerna har inneburit telefonmöten, mailkonversationer och personmöten.

3 JÄRNVÄGSSPÅRET

3.1 SPÅRUPPBYGGNAD

Järnvägsspåret belastas av tåglasten. Denna belastning sprids till en större yta för att minimera trycket mot banundergrunden. Kontaktkraften mellan hjul och räl överförs från en liten area på ungefär $\sim 3 \text{ cm}^2$ via slipers och ballast ned till banundergrunden som belastas på en yta på ungefär $\sim 3 \text{ m}^2$.



Figur 1. En förenkling av kraftutspredning från hjul-räl kontaktytan till banunderbyggnaden. Observera att kraften från ett hjulpar sprids ut till flera sliprar, vilket inte framgår av bilden. [3]

Rälen består av stål och ska möjliggöra en mjuk tåggång. Den rälsprofil som används oftast är UIC 60, vilket betyder att rälsprofilen har en vikt på 60 kg/m. Rälen ska ta upp krafterna från det passerande tåget och överföra dem till sliparna.

Sliprarna överför och fördelar belastningskraften från rälen till ballasten. Ytterligare en uppgift för slipern är att upprätthålla spåråläget. Betongslipers har en högre vikt, vilket ger förbättrad spårstabilitet. Detta är att föredra vid högre axellaster. Slipern ska dessutom ha ett litet underhållsbehov, vara vädertåligt och ha lång livslängd.

Mellan slipern och rälen finns så kallade mellanlägg, vars uppgift är att skydda sliprarna från krosskador av den höga belastningen från rälen vid tågpassage. Detta förlänger därmed sliperens livstid.

Ballasten motverkar förskjutningar av sliprarna och rälen. Dess huvuduppgift är att fördela kraften från slipers ned till banundergrunden. Den ska överföra ett jämnt tryck, för att minska risken för bland annat jordskred. Ballastdjupet är vanligtvis mellan 0,3 m till 0,5 m. Dessutom ska den ha goda dräneringsegenskaper, för att motverka tjälbildning i bankroppen. Om det blir tjäle i bankroppen kommer spåret bli styvt, vilket medför att spårkrafterna ökar.

Mellan ballasten och undergrunden finns underballasten. Den ska motverka att finmaterial pumpas upp från banundergrunden och blandar sig med ballasten, vilket skulle påverka ballastens bärighet.

Slutligen överförs trycket ned till banundergrunden, som består av berg eller jord. Trycket ska då ha spridits ut till den grad att den naturliga undergrunden kan absorbera belastningen, utan jord- eller bergskred som följd. [3] [4]

3.2 SPÅRKRAFTER

De vertikala spårkrafterna kan delas in i olika kategorier som listas nedan.

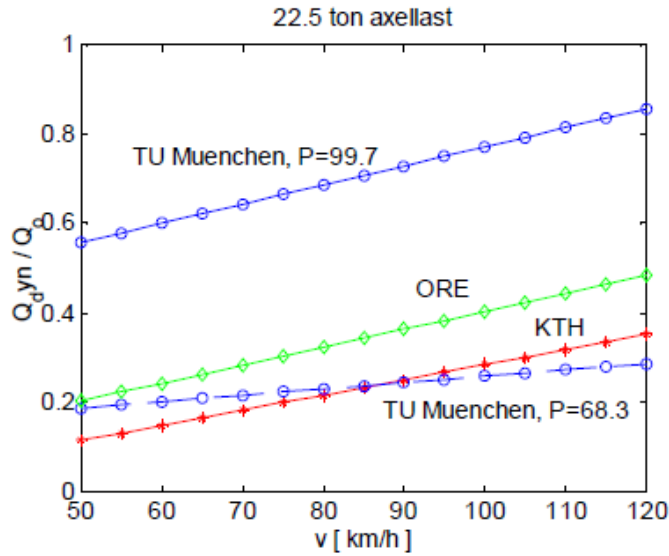
Tabell 1. Storleken på de vertikala hjulkrafterna som används vid beräkningar i rapporten. [5]

Förklaring	Storlek
Statisk hjullast Q_0	100 %
Kvasistatisk last vid kurvtagning Q_k	20 %
Dynamiskt tillskott pga. ojämnheter i spåret eller hjulen Q_{ds}	30%

Den statiska hjullasten är grundkraften som belastar spåret vid stillastående. Vid tåggång måste även ett dynamiskt tillskott beaktas. Det dynamiska tillskottet beror på spårjämnheter, exempelvis rälskarvar eller rälskorugering eller förändringar i spårstyvhet. Vid en ökad hastighet ökar även det dynamiska tillskottet. En avgörande faktor vad gäller det dynamiska tillskottet är tåggets ofjädrade massa. Även eventuella hjulplattor påverkar det dynamiska tillskottet avsevärt. [5]

Den kvasistatiska lasten är ökningen av kontaktrycket på ytterrälen vid kurvtagning på grund av centrifugalkraften. Beräkningarna i denna rapport kommer att anta en kvasistatisk last på 20 % av den statiska lasten. Detta motsvarar en genomsnittlig kurva.

Enligt KTH *Rail Vehicle Dynamics* [5] brukar det dynamiska tillskottet från spårjämnheter typiskt ligga mellan 20-40 % av den statiska hjullasten. Storleken på det dynamiska tillskottet varierar beroende vilken predikteringsmodell som används. I Figur 2 presenteras det dynamiska tillskottet för olika modeller.



Figur 2. Det dynamiska tillskottet som funktion av hastigheten för olika predikteringsmodeller. [6]

Eisenmann från TU München predikterar det dynamiska tillskottet enligt följande. [6]

$$Q_{tot} = Q_{stat}(1 + t * \sigma) \quad (1)$$

$\sigma = 0,1\varphi$ för goda spårförhållanden

$\sigma = 0,2\varphi$ för hyfsade spårförhållanden

$\sigma = 0,3\varphi$ för dåliga spårförhållanden

$$\varphi = 1 + \frac{(v_0 - 60)}{140} \quad (2)$$

Enligt Eisenman ska $t = 3$ väljas för representativa dynamiska laster. Detta motsvarar att det är en sannolikhet på 99,7 % att de dynamiska krafterna är lägre än predikterat i modellen. I denna rapport antas goda spårförhållanden på Malmbanan och en hastighet på $v_0 = 60 \text{ km/h}$

$$Q_{tot} = Q_{stat}(1 + 3 * 0,1) = 1,3Q_{stat} \quad (3)$$

Detta betyder att det dynamiska tillskottet i denna rapport kommer antas vara 30 % av den statiska hjullasten. Då antas att spåren på Malmbanan är av god kvalitet. Detta överensstämmer även väl med predikteringsmodellen från ORE, enligt Figur 2.

3.3 SPÅRSTYVHET

Spårstyvheten definieras som förhållandet mellan belastningen och den vertikala nedsjunkningen av spåret. Egenskaperna hos banundergrunden varierar längs med spåret och därmed varierar även spårstyvheten. Sträckvis sker ibland en markant skillnad i spårstyvhet längs spåret då banan går från en mjuk till en fast banundergrund, vilket genererar ett högt dynamiskt tillskott, se avsnitt 3.2. Ett högt dynamiskt tillskott kommer att ge en påskyndad spårnedbrytning, såsom ökat slitage och utmattning av rälen, ökad sättningshastighet av banvallen på grund av deformationer i ballast och banundergrund, ökad risk för sprickbildning i sliprar. [7]

Spårstyvheten påverkas i stor grad av egenskaperna hos banundergrunden. En mjuk banundergrund kan ge stora förskjutningar av banvallen vid tågpassage. Detta resulterar i att rälen blir utsatt för stora böjmoment, vilket påskyndar utmattningsskador på rälen. En stor förskjutning av rälen ger däremot en minskad belastning på sliprarna, eftersom det ger en mer utspridd kraftfördelning mellan sliprarna. Även det dynamiska tillskottet kommer att bli lägre. En fast undergrund kommer resultera i det motsatta, det vill säga små böjmoment på rälen, större belastning på enskilda sliprar och ett högt dynamiskt tillskott. [8]

4 MALMBANAN I DAGSLÄGET

På Malmbanan transporterar LKAB i dagsläget (år 2015) ungefär 29 miljoner ton järnmalm per år till hamnarna i Narvik och Luleå. Idag tillåter Trafikverket en axellast på STAX 30 och en metervikt på STVM 12. Banan är 473 km lång och innefattar 114 broar, varav södra omloppet är 227 km och innefattar 53 broar. Banan är enkelspårig och elektrifierad, den största lutningen längs banan i lastat tillstånd är 1,4 %. [9]

Det södra omloppet, som behandlas i denna rapport, sträcker sig från Koskullskulle via Gällivare och Boden till Luleå. Sträckan från Boden till Luleå är en del av ”Stambanan genom övre Norrland” men trafikeras av malmtåg. I denna rapport benämns även denna bandel som en del utav Malmbanans södra omlopp. Malmbanan trafikeras av både persontåg och godstrafik, dock dominerar LKABs malmtransporter. Malmtågen består av Fanoo-vagnen och IORE-loken. [10]

Bandelarna som innefattar det södra omloppet är:

Bandel 114 – mellan Koskullskulle och Gällivare, 9,4 km

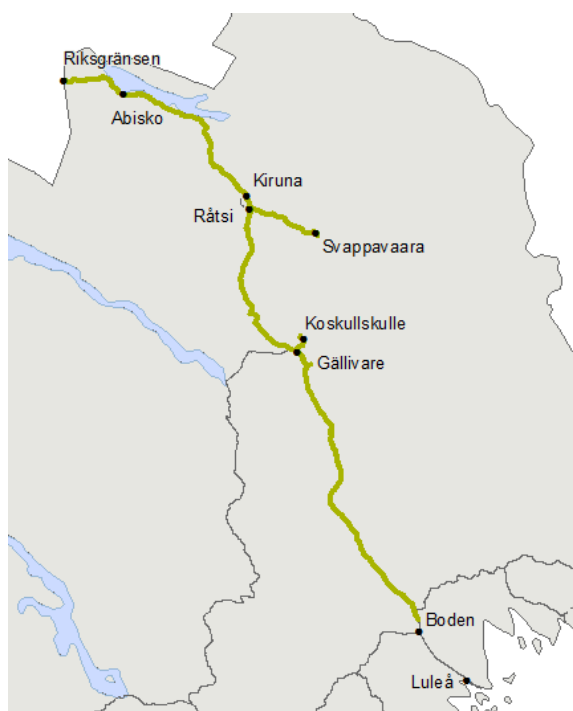
Bandel 118 – mellan Gällivare och Boden, 164 km

Bandel 120 – i Boden, 8,8 km

Bandel 119 – mellan Boden och Luleå, 35 km

Bandel 122 – från Luleå till malmhamnen i Sandskär, 9,7 km

IORE-loken är framställda för att dra tunga tåg. LKABs malmtåg består av 68 vagnar, där varje vagn har en lastkapacitet på 100 ton. Ett enskilt tåg fraktar därför 6 800 ton järnmalm och är ungefär 750 meter långt. [11]



Figur 3. Karta över Malmbanans sträckning. [10]

4.1 BANÖVERBYGGNAD

Ökade axellaster ställer högre krav på banöverbyggnaden, då den måste uppta en större belastning. Banöverbyggnaden innefattar bland annat *rälisen*, *rälsbefästningar*, *sliprar* och *ballasten*. Dess uppgift är kraftutspridning, upprätthålla spårläget samt att överföra ett jämnt tryck mot banunderbyggnaden.

4.1.1 Rälén

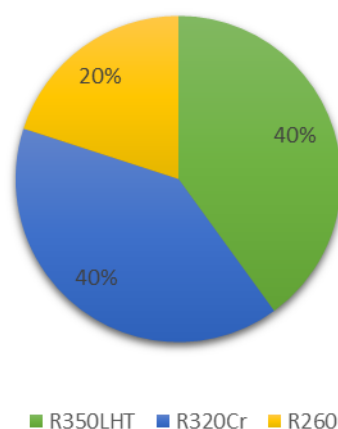
På Malmbanan används idag rälstålet R350LHT som standard vid rälsläggning, i spåret finns även R320Cr och standardräl R260. [12] Ett ännu hållfastare rälstål som skulle kunna användas i framtiden är R370CrHT. I Tabell 2 presenteras sträckgränsen för respektive rälstål.

Tabell 2. Sträckgränsen för olika typer av rälstål. [13]

Rälstål	Sträckgräns, σ_B
R260	880 MPa
R320Cr	1080 MPa
R350LHT	1175 MPa
R370CrHT	1280 MPa

Mellan Luleå och Riksgränsen är en sträcka på 434 spårkilometer. Fördelningen av rälstål på denna sträcka presenteras i Figur 4 nedan.

Fördelning av rälstål



Figur 4. Fördelningen av olika stålsorter längs sträckan Luleå - Riksgränsen år 2015. Siffrorna är avrundade. [12]

Mellan Luleå och Riksgränsen används idag rälsprofilen 60E1 på 80 % av sträckan och 50E3 på 20 % av sträckan. [12]

4.1.2 Rälsbefästningar

Befästningstyperna som ligger längs Malmbanan idag visas i Tabell 3 och mellanläggerna visas i Tabell 4. Informationen har hämtats från Trafikverkets baninformationssystem (BIS) TDOK 2015:0052 (Spårkomponenter Sliper och befästning). [14]

Tabell 3. Befästningstyperna på Malmbanan. [14]

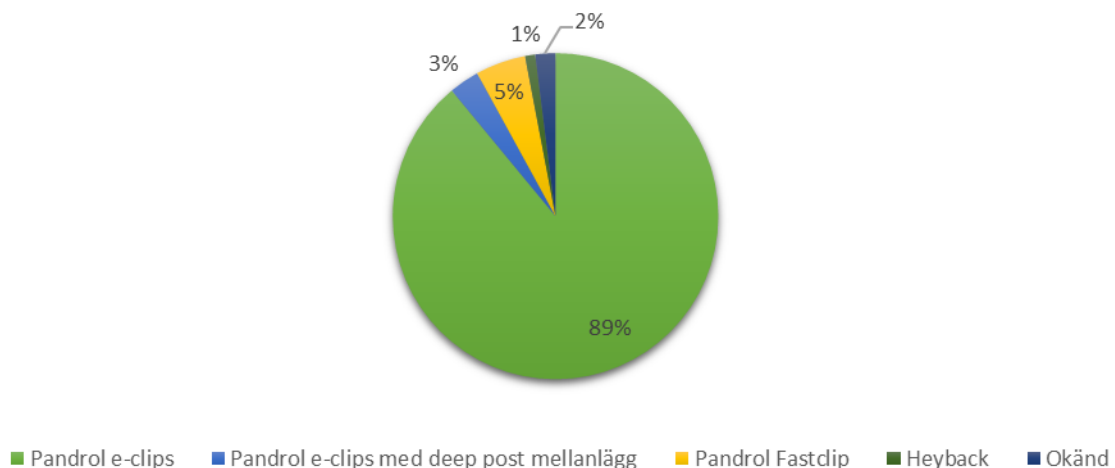
Befästning
Pandrol e-clip - Endast e1817 identifierbar Finns även e-PLUS och e2039
Pandrol Fastclip FC1604
Heyback

Tabell 4. Mellanläggerna på Malmbanan. [14]

Mellanlägg
Gummimellanlägg 5 alternativt 10 mm, För Heyback - 3,5 mm
Deep post gummimellanlägg 10 mm
Plastmellanlägg 10 mm
En del befästningar har okänt mellanlägg

Befästningstyperna är fördelade enligt Figur 5.

Fördelning av befästningstyper



Figur 5. Fördelningen av olika befästningstyper på det södra omloppet år 2015. [14]

Pandrol e-clips, som är den huvudsakliga befästningen, finns i flera olika versioner där endast e1817 är identifierbar. Det finns även e-clips av typerna e-PLUS och e2039 längs med banan, som är starkare befästningstyper med högre klämkraft, se avsnitt 5.2.2. Fastclip är också en befästningstyp från Pandrol med starkare egenskaper. Heyback är de enda befästningarna som inte är från Pandrol och finns endast på de korta sträckor som fortfarande har träslipers, se avsnitt 5.3.3.

En ordentlig komponentinventering för befästningssystemen rekommenderas i syfte att bestämma dess modell och positionering.

4.1.3 Slipers

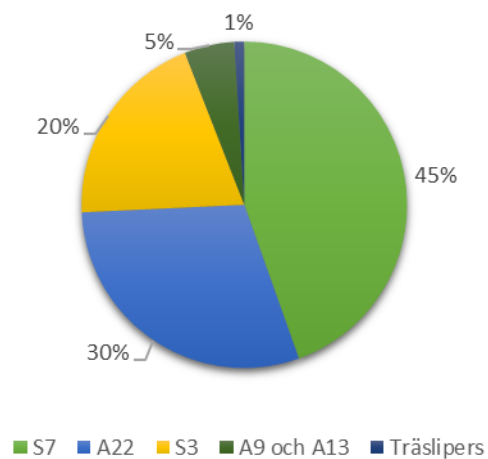
I huvudspår på södra omloppet har det identifierats ett antal olika slipermodeller. Dessa är betongslipers av olika typer med olika inläggningsår (se Tabell 5), samt träslipers av furu och bokträ. Av dessa är endast A22 slipern dimensionerad för STAX 35. De övriga är dimensionerade för STAX 30 och lägre, vilket gör att dessa måste kontrollberäknas för STAX 32,5 och högre. [14]

Tabell 5. Betongslipermodellerna på Malmbanan. [14]

Slipermodell	Inläggningsår
S3	1975
S7	1989
A9	1989
A13	2002
A22	2007

Fördelningen av slipermodeller på sträckan Luleå - Riksgränsen presenteras i Figur 6 nedan.

Fördelning av slipermodeller



Figur 6. Fördelningen av olika slipermodeller längs sträckan Luleå - Riksgränsen år 2015. Siffrorna är avrundade. [12]

4.1.4 Ballast

Ballasten på Malmbanan består av makadam och är generellt av god kvalitet. Dock är den sträckvis kraftigt förorenad. Det finns två huvudsakliga föroreningar och dessa är skvättsträckor, då finmaterial vandrar upp från underballasten, samt att det spills pellets och slig från malmvagnarna. För att minska föroreningsgraden krävs ballastrening, vilket senast utfördes år 1996 då delar av sträckan ballastrenades i samband med axellastökningen till STAX 30. Ballastdjupet varierar och är på sina håll mindre än 50 cm. Vissa sträckor med mindre än 50 cm ballastdjup och svag undergrund har redan åtgärdats. [15] [16]



Figur 7. En skvättsträcka på Malmbanan. Runt den mittersta slipern har finmaterial vandrat upp i ballasten.

Underballasten består av grusig sand och ska vara minst 2,2 m djupt för att förhindra tjäle i bankroppen. Sträckvis understiger underballastens djup 2,2 m, vilket kan leda till tjälbildning. Detta kan motverkas med frostisolering, vilket redan har använts på vissa bansträckor. [16]

4.2 BANUNDERBYGGNAD

En ökad axel- och meterlast ställer högre krav på banunderbyggnaden. Den ska vara bärkraftigt samt ha goda dränerande egenskaper. I banunderbyggnaden innefattas bland annat *geoteknik*, *broar* och *trummor*.

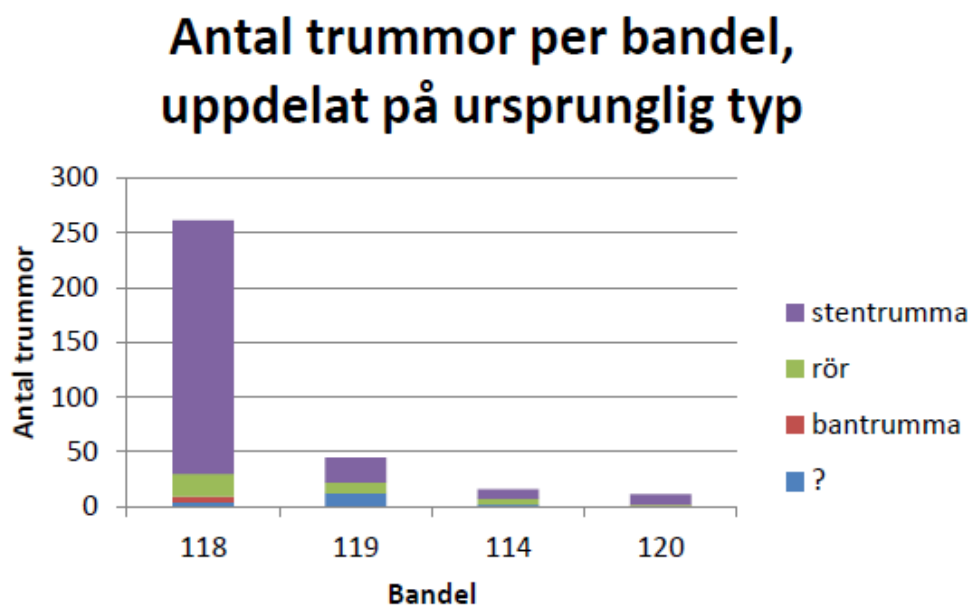
4.2.1 Geoteknik

Södra omloppet av Malmbanan kan delas in i två olika bansträckor med vitt skilda geotekniska förhållanden. Den östra/södra bansträckan mellan Luleå-Boden-Holmfors är förlagd på havs- och sjösediment med en instabil undergrund. Resterande bansträcka är förlagd på mestadels moränmark med vidsträckta partier utav myrmark där banan kan anses vara flytande i torvjorden. [16] [17]

4.2.2 Trummor

På det södra omloppet finns i dagsläget 333 trummor. Många trummor belägna med ett litet överfyllnadsdjup har utsatts för hög belastning på Malmbanan. Detta har medfört att flertalet trummor har glipor där bankfyllning och stenar fallit ned. Skadorna är mest förekommande i skarven mellan den gamla stentrumman och förlängningen, som implementerats då banvallen breddats. [16] [18]

Typ av trumma och antalet trummor per bandel presenteras i Figur 8.



Figur 8. Antalet trummor per bandel på Malmbanans södra omlopp. [18]

4.2.3 Broar

Det finns 53 stycken broar på Malmbanans södra omlopp. Av dessa är 52 stycken betongbroar och en stålbro. Påverkan av en axellastökning är olika beroende på typ av bro och egenskaperna för respektive bro. Varje bro är unik och måste bärighetsutredas enskilt. [18]

I en observationsundersökning av Trafikverket (utförd 2009 – 2011) beaktas broarna på södra omloppet. [19]

- 24 broar har en överbyggnad dimensionerad för STAX 25 (byggda 1953 - 1980)
- 27 broar har en överbyggnad dimensionerad för STAX 30 (byggda 1980 - 2000)
- 2 broar har en överbyggnad dimensionerad för STAX 35 (byggda 2007 – 2008)

Figur 9 visar bron över Svartbäcken, som är dimensionerad för STAX 25. Här har spännvidden förkortats för att bron ska klara en högre belastning.



Figur 9. Bron över Svartbäcken som är dimensionerad för STAX 25.

5 BANKOMPONENTERNAS PÅVERKAN AV EN AXELLASTÖKNING

5.1 RÄLEN

Höga axellaster resulterar i att rälen utsätts för en större belastning. En hög belastning förkortar livslängden. Livslängden för en räl förkortas av olika faktorer som listas nedan.

- Slitage (Nötning) sker vid all kontakt mellan hjul och räl. Det största slitaget sker vid kurvtagning, då farsidan av rälen och flänsen på hjulet utsätts för ett stort kontaktryck. Slitaget är mest omfattande i skarpa kurvor.
- Plastisk deformation sker då kontaktpänningen mellan hjul-räl blir högre än sträckgränsen för rälstålet. Störst risk för plastisk deformation är vid högre axellaster och då det dynamiska tillskottet är som störst, det vill säga vid bland annat stora förändringar i spårstyvhet. Även vid kurvtagning är risken för plastisk deformation stor.
- Rälsskador uppkommer på grund av olika orsaker och skadorna har olika allvarliga effekter. Från små defekter som till exempel ger ökat slitage till allvarligare skador som kan ge rälbrott.

5.1.1 Prediktering av slitage

Det enklaste sättet att prediktera hjul- och rässlitage är att beräkna den energiomsättning som frigörs i ytan mellan hjul och räl. Denna modell beskriver endast i vilken omfattning slitage sker dvs. inte var eller vilken typ av slitage. Den definieras som energiförlusten för varje meter av sträckan hjulet färdas, enligt Ekvation (4). [5]

$$E = F_{\xi}v_{\xi} + F_{\eta}v_{\eta} + M_{\zeta}\phi \quad (4)$$

Där E är energiomsättningen, F_{ξ} och F_{η} är krypkrafterna och M_{ζ} är rotationsmomentet i kontaktytan mellan hjul och räl. v_{ξ} och v_{η} är kryptet (*eng. creepages*) och ϕ är rotationen (*eng. spin*) i kontaktytan.

Det ovanstående visar att omfattningen av slitaget beror till stor del på storleken av kontaktytan mellan hjul och räl. Detta eftersom ju större kontaktytan är desto större blir även krypkrafterna. [20]

$$F_{\xi} = -Gabc_{11}v_{\xi} \quad (5)$$

G är skjuvmodulen för stål, a och b är kontaktellipsens semiaxlar, c_{11} är Kalkers koefficient. F_{ξ} är krypkraften i longitudinell riktning.

Ett mer avancerat slitagemått är Archards slitagesmodell, vilken antar att glidning är nödvändigt för att slitage ska uppstå. För ett element $\Delta\xi\Delta\eta$ i glidningszonen ges ett slitagedjup på $\Delta\zeta$. [5]

$$\Delta\zeta = k \frac{p\Delta s}{H} \quad (6)$$

Där p är trycket i kontaktytan (kan fås från Hertz teorin, mer om det i Bilaga 1 i avsnitt 9.1), H är materialets hårdhet. Δs är den glidsträcka som en matrialpunkt på hjulet eller rälen utsätts för när den passerar ett element $\Delta\xi\Delta\eta$. k är slitagekoefficienten.

5.1.2 Normalspänning i kontaktytan mellan hjul och räl

Plastisk deformation sker i kontaktytan mellan hjul och räl när kontaktrycket överstiger rälstålets sträckgräns. Plastisk deformation av rälen resulterar i rälskorruering, se avsnitt 5.1.5.3. Kommande avsnitt presenterar kontaktrycket (normalspänningen) mellan hjul och räl. Beräkningarna för STAX 30 visas i *Bilaga 1 - Beräkning av normalspänningen i kontaktytan mellan hjul och räl* i avsnitt 9.1.

Rälstålet R260 har en sträckgräns på minst 880 MPa, se Tabell 2. [21] Normalspänningen mellan hjul och räl vid olika axellaster presenteras i Tabell 6.

Tabell 6. Normalspänningen mellan hjul och räl vid olika axellaster. (Statisk hjullast)

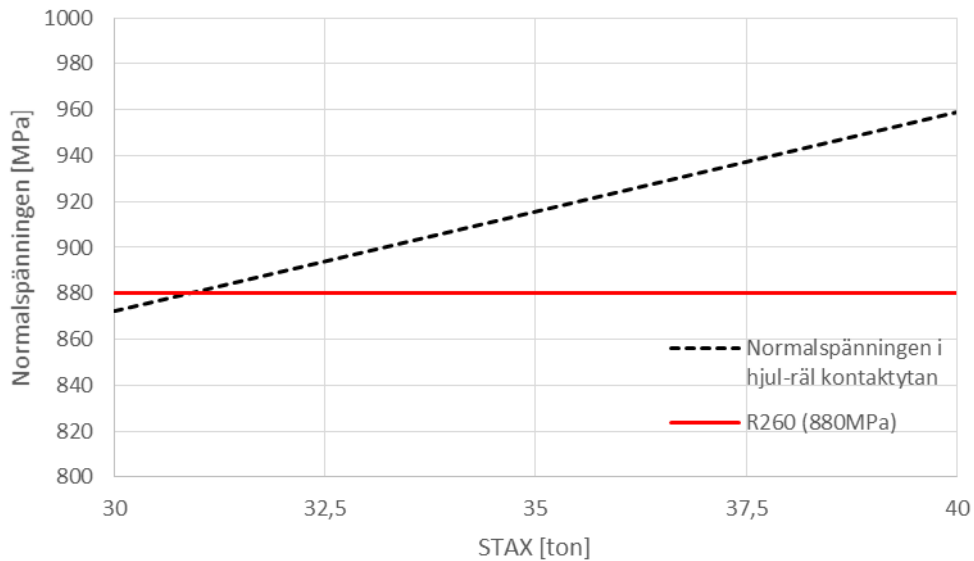
Axellast	Normalspänning i kontaktytan hjul och räl (Statisk hjullast), σ_{max}
STAX 30	670 MPa
STAX 32,5	688 MPa
STAX 35	705 MPa
STAX 37,5	721 MPa
STAX 40	737 MPa

I beräkningarna antas att det dynamiska tillskottet motsvarar 30 % av den statiska lasten, se avsnitt 3.2. Normalspänningen i kontaktytan mellan hjul och räl när även det dynamiska tillskottet beaktas presenteras i Tabell 7.

Tabell 7. Normalspänningen i kontaktytan mellan hjul och räl (Statisk + Dynamisk hjullast)

Axellast	Normalspänning i kontaktytan hjul och räl (Statisk + Dynamisk hjullast), σ_{max}
STAX 30	871 MPa
STAX 32,5	895 MPa
STAX 35	917 MPa
STAX 37,5	937 MPa
STAX 40	958 MPa

Normalspänningen i hjul - räl kontaktytan



Figur 10. Normalspänningen i kontaktytan mellan hjul och räl (Statisk + Dynamisk hjullast). Det röda strecket indikerar sträckgränsen för standardräl R260 på 880 MPa.

Resultatet (Tabell 7 och Figur 10) visar att plastisk deformation i hjul-räl kontaktytan troligtvis kommer att ske på axellaster över STAX 30 för rälstålet R260 vid ogynnsamma spårförhållanden. Plastisk deformation i kontaktytan mellan hjul och räl leder vanligtvis till rälskorrogering, se avsnitt 5.1.5.3. Vid extremfall det vill säga då det dynamiska tillskottet är större än 30 % riskerar plastisk deformation att ske även vid STAX 30 för rälstålet R260. För att motverka plastisk deformation i hjul-räl kontaktytan för STAX 32,5 och högre behövs ett hållfastare rälstål. Detta skulle exempelvis kunna vara R320Cr eller R350LHT, som redan i dagsläget används i stor utsträckning (se avsnitt 4.1.1). Vid snabba spänningsförändringar, såsom stora skillnader i spårstyvhet, ökar stålets sträckgräns tillfälligt. Detta är gynnsamt för att motverka plastisk deformation. [22]

Ett ytterligare alternativ för att minska

5.1.3 Skjuvspänning i rälshuvudet

Tunga axellaster kommer att ge höga spänningar i rälshuvudet. Rälstålet behöver därför ha en hög sträckgräns för att klara av belastningen. I följande avsnitt beräknas den största tillåtna axellasten för de tre olika sorters rälstål som används på Malmbanan idag.

Beräkningarna sker på den effektiva hjullasten, enligt Ekvation (7) (beteckningar enligt Tabell 1)

$$Q = Q_0 + Q_k + Q_{ds} \quad (7)$$

Den tillåtna hjullasten beror på hjulradien och sträckgränsen för respektive rälstål. [2] [22]

$$Q_{till} = 6,0 * 10^{-7} * r * \left(\frac{\sigma_B}{v}\right)^2 \quad (8)$$

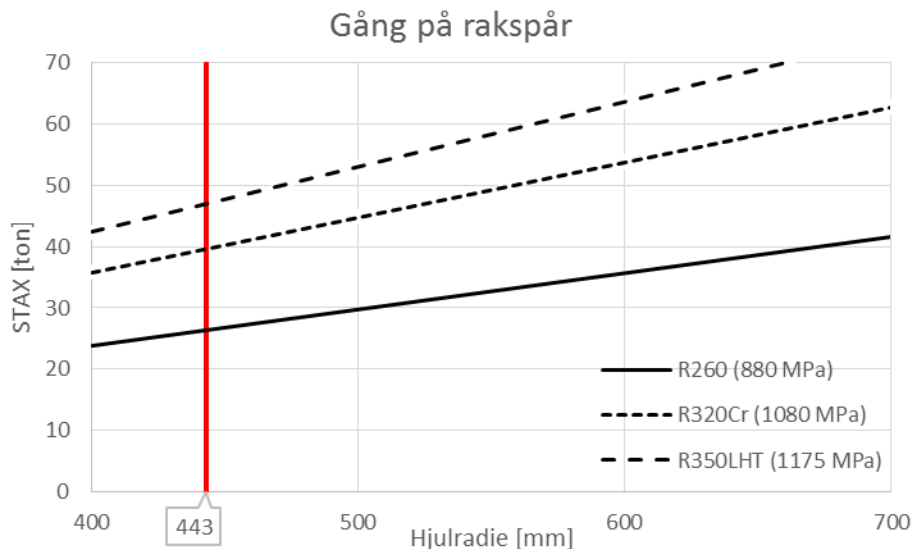
Ekvation (8) beräknar den maximalt tillåtna hjullasten Q_{till} för att den maximala skjuvspänningen inte ska riskera att bilda shellings, se avsnitt 5.1.5.2.

Där r är hjulradien, σ_B är sträckgränsen för räilstålet och v är en säkerhetsfaktor som tar materialdefekter och avvikande rälsförhållanden i hänsyn. En rimlig säkerhetsfaktor antas att vara $v = 1,1$. [2]

I Figur 11 nedan visas STAX för de olika räilstålen, samt hur den förändras med hjulradien. Det röda strecket indikerar hjulradien för Fanoo-vagnens hjul på $r = 443$ mm. Figuren visar tåggång på rakspår, det vill säga att endast den statiska och dynamiska hjullasten beaktas, enligt Ekvation (9).

$$Q = Q_0 + Q_{ds} \quad (9)$$

Genom att studera Figur 11 dras slutsatsen att standardrälen (R260) inte har tillräckligt hög sträckgräns för STAX 30, enligt Ekvation (8). R320Cr ligger i gränssonen för vad som krävs vid STAX 40, medan R350LHT uppfyller kraven för STAX 40 med god marginal, enligt Ekvation (8).

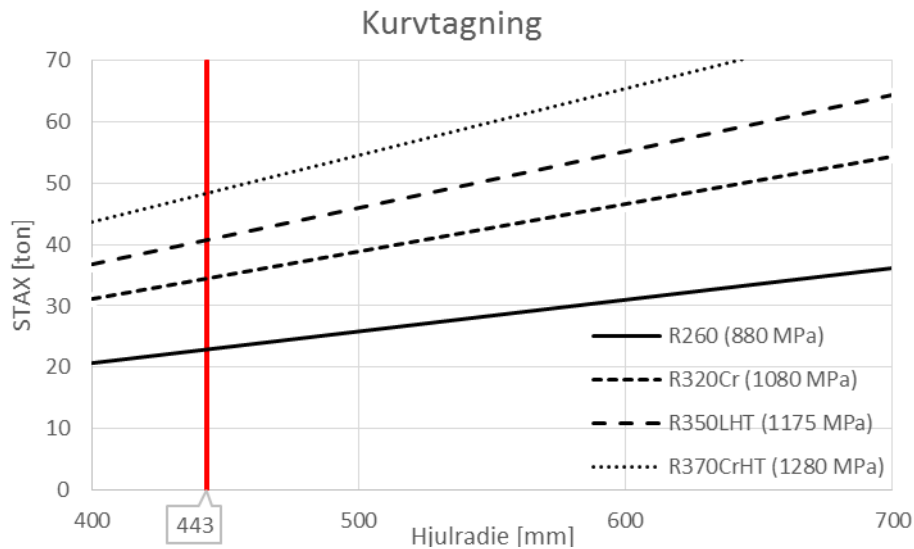


Figur 11. STAX för de olika räilstålen med avseende på hjulradien. Det röda strecket indikerar hjulradien på Fanoo-vagnen på 443 mm.

Vid kurvtagning tillkommer en kvasistatisk last, som typiskt är runt 20 % av den statiska lasten för godståg, se avsnitt 3.2. Med detta tillskott blir den effektiva hjullasten.

$$Q = Q_0 + Q_k + Q_{ds} \quad (10)$$

Det STAX som rälsstålet maximalt klarar av kommer därför att vara lägre vid kurvtagning än vid gång på rakspår, enligt Figur 12.



Figur 12. STAX för de olika rälsstålen med avseende på hjulradien vid kurvtagning. Det röda strecket indikerar hjulradien för Fanoo-vagnen på 443 mm.

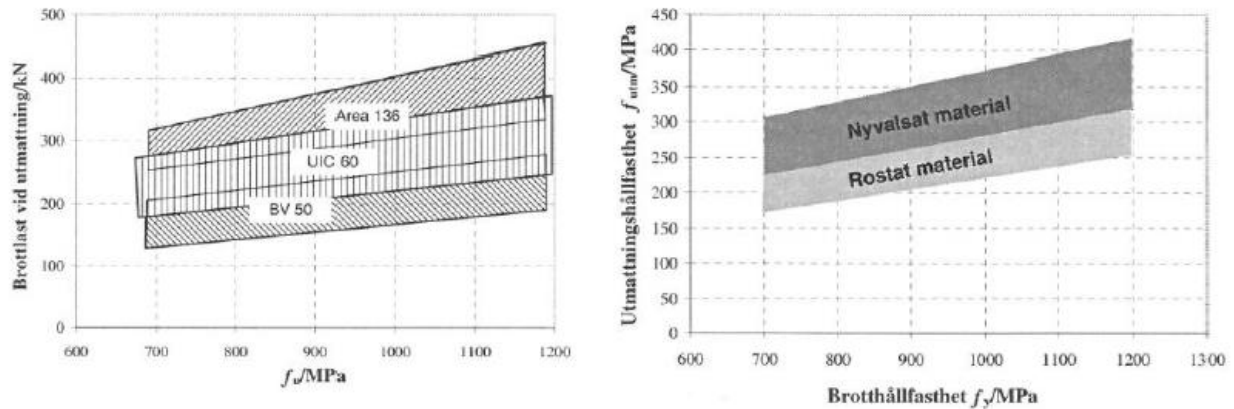
Figur 12 visar att ytterrälen i en genomsnittlig kurva kan bestå av rälsstålet R320Cr upp till STAX 32,5. Vid högre axellaster måste ett hållfastare rälsstål implementeras som ytterräl, enligt Ekvation (8). Detta skulle exempelvis kunna vara R350LHT, vilket förslagsvis skulle kunna läggas som ytterräl i kurvor till STAX 40. För väldigt skarpa kurvradier med högre kvasistatisk last än 20 % skulle R370CrHT kunna tillämpas för STAX 40. Observera även att hjulradien minskar av hjulslitage, vilket troligtvis kommer att leda till att sträckgränsen för R350LHT inte är tillräckligt vid kurvtagning för STAX 40. Även i detta fall måste ett starkare rälsstål implementeras, som exempelvis R370CrHT.

Upp till STAX 37,5 kan R320Cr användas på rakspår och R350LHT användas som ytterräl i kurvor, enligt Figur 11 och Figur 12. För STAX 40 kommer spänningen i rälshuvudet vara större än det maximalt tillåtna för R320Cr, se Figur 11. Detta betyder att R350LHT förslagsvis kan användas både för rakspår och som ytterräl i kurvor, vilket skulle vara tillräckligt för att klara av spänningen i rälshuvudet för STAX 40, se Figur 11 och Figur 12. I skarpa kurvor läggs förslagsvis R370CrHT, med ännu högre sträckgräns. Ett annat alternativ är att förstora hjulradien på malmvagnarna och på så sätt möjliggöra för STAX 40 med R320Cr på rakspår och R350LHT som ytterräl i kurvor.

5.1.4 Böjspänning i rälsfoten

De största böjspänningarna uppstår vanligtvis i rälsfoten för en fritt upplagd räl med nedböjande belastning. Största tillåtna böjspänning är $\sigma_{max} < 190 \text{ MPa}$ för R260, enligt *Deutsche Bahn*. Detta kan ses som värsta möjliga scenario, nämligen då rälen är kraftigt korroderad. Om gränsvärdet överskrids förkortas endast rälsens livslängd. [14]

Utmattningskapaciteten beror bland annat på rälsprofilen och rälstålets sträckgräns. Figur 13 visar utmattningskapaciteten för två miljoner belastningscykler.



Figur 13. Utmattningskapaciteten efter två miljoner belastningscykler för stål med olika sträckgräns och olika rälsprofiler. Motsvarar ungefär 2,5 års drift. [14]

Den maximala böjspänningen i rälsfoten ges av Ekvation (11). [23]

$$\sigma_{max} = \frac{QL}{4W_{yf}} \quad (11)$$

Där Q är den effektiva hjullasten, enligt Ekvation (7), W_{yf} är böjmotståndet relativt rälsfoten samt L är karakteristiska längden av rälen.

Den karakteristiska längden av rälen ges av Ekvation (12).

$$L = \sqrt[4]{\frac{4EI}{k}} \quad (12)$$

Där EI är rälsens böjstyvhet och k är en elasticitetskoefficient för banunderbyggnaden, vilken varierar beroende på kvalitén av banundergrunden.

Beräkningarna av böjspänningen i rälsfoten vid kurvtagning för STAX 30 visas i *Bilaga 2 - Beräkning av maximala böjspänningen i rälsfoten för STAX 30* i avsnitt 9.2.

Den maximala böjspänningen i rälsfoten vid tåggång på rakspår presenteras i Tabell 8, enligt Ekvation (11) och (12). Vid rakspår är den effektiva hjullasten $Q = Q_0 + Q_{ds}$, enligt Ekvation (9). Beräkningarna är gjorda på antagandet av medelbra kvalitet på banundergrunden.

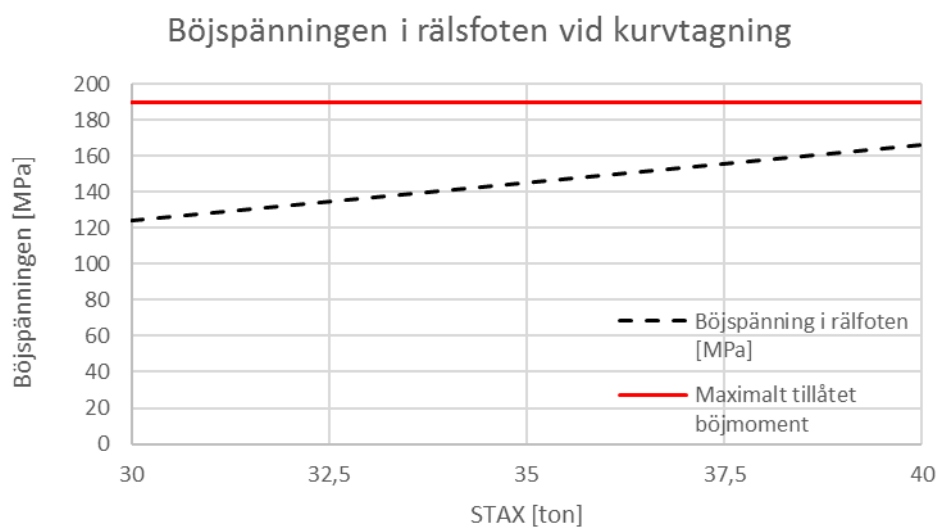
Tabell 8. Dragspänningen i rälsfoten på rakspår.

Axellast	Dragspänning i rälsfoten, σ_{max}
STAX 30	108 MPa
STAX 32,5	117 MPa
STAX 35	126 MPa
STAX 37,5	135 MPa
STAX 40	144 MPa

Vid kurvtagning är den effektiva hjullasten $Q = Q_0 + Q_k + Q_{ds}$, enligt Ekvation (7). Med antagandet att den dynamiska hjullasten är 30 % och kvasistatiska lasten är 20 % (se avsnitt 3.2) fås följande resultat på böjspänningen i rälsfoten, se Tabell 9 och Figur 14.

Tabell 9. Dragspänningen i rälsfoten vid kurvtagning.

Axellast	Dragspänning i rälsfoten vid kurvtagning, σ_{max}
STAX 30	124 MPa
STAX 32,5	135 MPa
STAX 35	145 MPa
STAX 37,5	156 MPa
STAX 40	166 MPa



Figur 14. Den maximala böjspänningen i rälsfoten vid kurvtagning. Det röda strecket indikerar det maximalt tillåtna böjmomentet i rälsfoten för standardräl R260, enligt Deutsche Bahn.

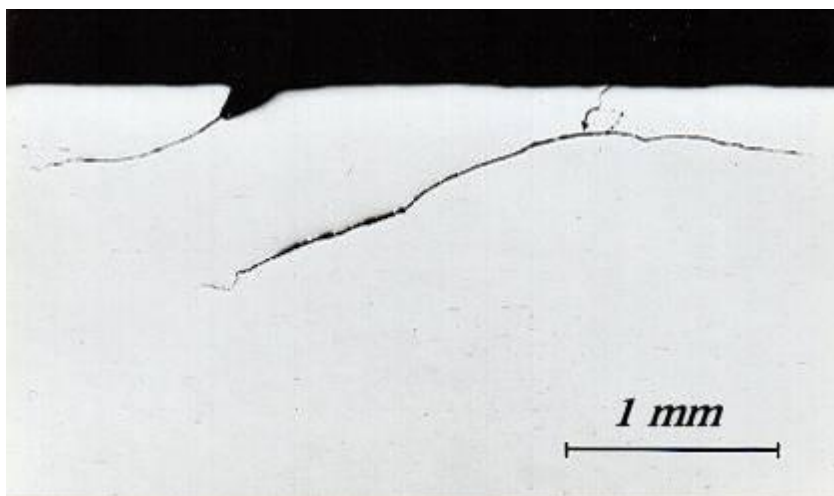
Figur 14 visar att den maximala böjspänningen inte kommer att överstiga gränsvärdet på $\sigma_{max} < 190 \text{ MPa}$ för standardräl R260 ens för STAX 40. På Malmbanan används numera hållfastare sorter av rälstål, såsom R320Cr och R350LHT, se Tabell 2. Detta gör att gränsvärdet för böjspänningen kommer att vara högre än det utsatta, enligt Figur 13. Slutsatsen av beräkningarna ovan är därför böjspänningen i rälsfoten ej kommer att vara avgörande vid val av rälstål för olika STAX. Samtliga sorter av rälstål på Malmbanan bedöms klara av böjspänningen i rälsfoten ända upp till STAX 40.

5.1.5 Rälsskador

Rolling Contact Fatigue är den vanligaste typen av rälsskada och uppstår på farkanten på grund av höga kontaktspänningar vid hjul-räl kontakt. Det finns olika sorters RCF skador bland annat Head checks, som är ytsprickor i farkanten, och Shelling, som är en utmattningsskada som börjar under rälens yta. Vid plastisk deformation i kontaktytan mellan hjul och räl uppstår rälskorrugering.

5.1.5.1 Head Checks

Head checks är som tidigare nämnts, ytsprickor som uppstår i farkanten då de tangentiella spänningarna i rälens yta blir för stora. Sprickorna uppstår framförallt i kurvor eftersom där är krypkrafterna, och därmed spänningarna, som störst. Sprickorna kan bli 2-5 mm djupa och är vinklade emot den huvudsakliga trafikriktningen. Avståndet mellan sprickorna är 1-5 mm och alla sprickor är riktade åt samma håll. Små flisor och kilar av metall kan brytas loss mellan sprickorna, kallad Spalling. Skadorna åtgärdas genom slipning av rälens yta. [6] [24]



Figur 15. Tidigt stadium av head checks. [24]

5.1.5.2 Shelling

Shelling är en utmattningsskada som sker 2-10 mm under ytan vid farkanten och sker framförallt i ytterrälerna i kurvor. Dessa skador är betydligt vanligare när rälerna framförallt trafikeras av höga axellaster, se avsnitt 5.1.3 för beräkningar för att motverka shellings. Till att börja med syns Shelling som mörka fläckar på farkanten av rälerna. Shelling sprickorna växer sedan ut mot farkanten och växer ut till flisor eller fortsätter växa inåt i rälens tvärsnitt, vilket till slut kan leda till rälsbrott.

RCF skadorna uppkommer av kontaktspänningen mellan hjul och räl. Denna påverkas av hjullasten, men också av hjul- och rälsprofilen. För att minska uppkomsten av skador används olika metoder såsom: räls smörjning i kurvor, hållfastare räler, modifierad rälsprofil, större kurvradie, anpassad rälsförhöjning.



Figur 16. Ett tvärsnitt av rälen som visar Shelling. [24]

5.1.5.3 Rälskorrugering

Rälskorrugering är en spårjämnhet med kort våglängd och är oftast belägen på farbanan av rälshuvudet. [5] Uppkomsten beror på ojämnt slitage på farbanan och detta orsakas av ett antal faktorer kopplade till interaktionen mellan bana och fordon. [2]

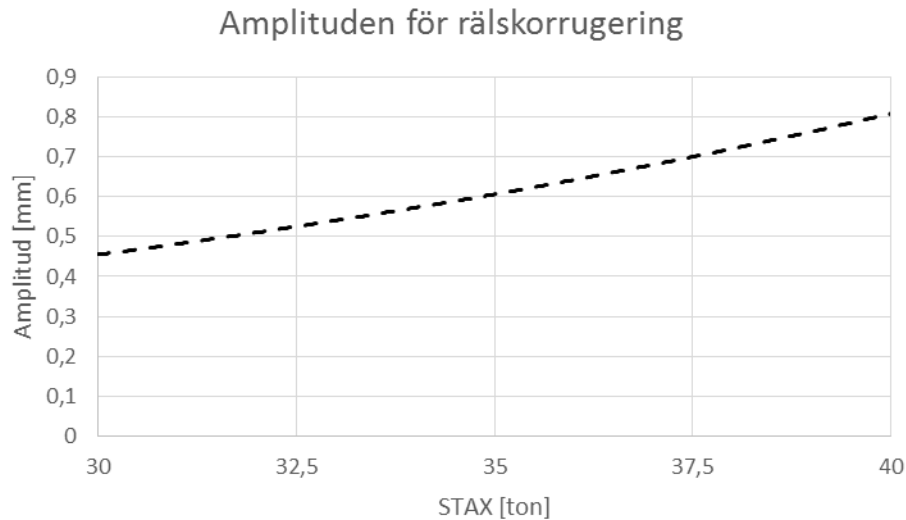
- Sinusformad rörelse av vagnshjulen vid gång på rakspår.
- Oscillerande vridrörelse av hjulaxeln.
- Elastisk deformation av drivaxeln.
- Plasticering av rälsen vid hjul-räl kontakt pga. tung axellast.
- Kontakt- eller ytkorrosion.
- Oxidering av rälstålet.

Ojämnheterna orsakar buller och ökat dynamiskt tillskott, se avsnitt 3.2. Vid högre axellaster är orsaken till rälskorrugering oftast att rälsen deformeras plastiskt i kontaktytan mellan hjul och räl vid tågpassage. Detta eftersom kontaktspänningen är högre än rälstålet sträckgräns, se avsnitt 5.1.2. Våglängden är vanligtvis mellan 200 - 300 mm och frekvensen 30 Hz på tunga godslinjer. [2]

AREMA har härlett en formel som predikterar amplituden på rälskorrugering. Modellen anses som aning pessimistisk vid normal tågdrift, men ger realistiska resultat vid tillämpning på tunga axellaster. [2]

$$y = 0,0005 * M^2 \quad (13)$$

Där y är amplituden på rälskorrugeringen och M är axellasten i ton.



Figur 17. Ökningen av amplitud för rälskorrugering beroende på STAX.

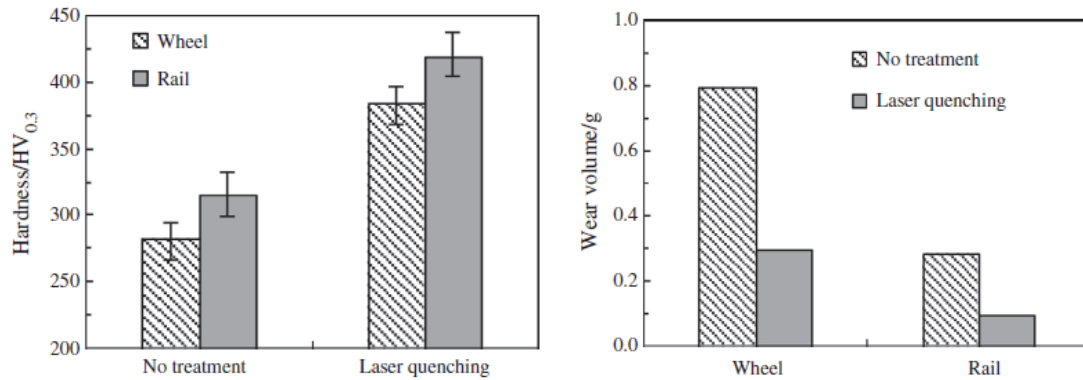
Figur 17 visar att amplituden ökar med ökad axellast. Detta motverkas främst genom att implementera ett hållfastare räilstål, vars sträckgräns bör överstiga kontaktrycket mellan hjul och räl vid normal tåggång. Trots detta kommer rälskorrugering sannolikt att uppstå på banpartier med ett högt dynamiskt tillskott. Den mest effektiva åtgärden mot rälskorrugering är räls slipning.

5.1.5.4 Möjliga underhållsåtgärder av rälsen

En ökad axellast kommer att leda till ett högre tryck och högre krafter i kontaktytan mellan hjul och räl. Detta resulterar i ett ökat krav på rälstålet som måste stå emot slitage, utmattning (RCF) och plastisk deformation. Några möjliga åtgärder för att uppfylla kraven presenteras nedan. [25]

- Använda ett rälsmaterial som har hög sträckgräns för att motverka plastisk deformation, vilket i sin tur motverkar rälskorrugering.
- Räls slipning, då ett sliptåg slipar bort skador på rälen. På Malmbanan är vanliga kontaktutmattningsskador head checks, spalling, shelling. En annan orsak till räls slipning är bortslipning av rälskorrugeringar samt att återställa rälsprofilen till den ursprungliga. [26]
- Att använda friktionsmodifierare dvs. en smörjningsanordning som stationeras ut i skarpa kurvor. Precis innan tågpassage skjuts olja ut på rälsens farbana, för att minska friktionen mellan hjul och räl och på så sätt minska slitaget. [5]

Forskning har kommit fram till ett nytt sätt att erhålla hållfastare räler med hjälp av laserhårdning. Processen kan även användas på vagnshjulen i syfte att hjulslitaget inte ska öka på grund av hårdare räler. Med hjälp av laserhårdning kan hårdheten av rälen respektive vagnshjulen öka, enligt Wang med flera. [27] Utförda tester visar att den totala omfattningen av slitaget (slitagevolymen) kan sjunka med 66,0 % för rälen respektive 62,9 % för hjulen. Testerna utfördes på en roller rig på *Southwest Jiaotong University*, se Figur 18. Enligt författaren av journalen kan laserhårdning även användas i fält, förslagsvis på farkanten av rälen i kurvor samt hjulflänsen. Detta i syfte att förlänga komponenternas livslängd.



Figur 18. Hårdhetsförändringen av hjulet och rälen vid laserhårdning, samt minskningen av räls- och hjulslitage. [27]

5.1.6 Rälssvetsning

Rälssvetsning används för att ge skarvarna liknande mekaniska egenskaper som de övriga partierna av rälen. I huvudsak finns två olika tekniker, *termitsvetsning* och *brännsvetsning*. På Malmbanan används för närvarande termitsvetsning.

5.1.6.1 Termitsvetsning

Proceduren går ut på att rälsändarna förs ihop, svetsformen sätts på plats, den aluminotermiska reaktionen antänds och rälsändarna smälts och sammanfogas. Avslutningsvis knackas svetsfogen bort från smältdegeln och räls slipning utförs till den korrekta rälsprofilen.

Nackdelen med denna metod är att egenskaperna hos svetsmaterialet skiljer sig från rälstålets. Utmattningskador kan uppstå eftersom rälsändarna våldsamt värms upp, vilket leder till kristallisering av rälstålet. Även kontraktionsspänningar uppstår i rälen, eftersom rälshuvudet och rälsfoten värms upp mer än räslivet. [2]



Figur 19. Termitsvetsning. [2]

5.1.6.2 Brännsvetsning

Brännsvetsning går ut på att rälstålet värms upp och svetsas med hjälp av en elektrisk ström. Inledningsvis kläms rälsändarna ihop och en ström förs igenom, vilket värmer upp rälstålet. Värmebildningen uppstår på grund av elektriska resistansen i kontaktytan mellan rälsändarna. Rälsändarna smälts och sammanfogas därefter.



Figur 20. En brännsvetsmaskin. [2]

Fördelen med denna svetsmetod är att enbart rälsmaterial används vid svetsningen, det vill säga inget svetsmaterial används. Dessutom är arean som värms upp mindre, vilket leder till en jämn hårdhetsfördelning över hela rälsnittet. Denna svetsmetod leder till avsevärt färre utmattningsskador. [2]

Enligt *Robert Ridley* som är *Rail Advisor* på BHP [28] är rälssvetsning en av de största begränsningarna vad gäller en axellastökning. På BHP använder man sedan tiotalet år tillbaka brännsvetsning istället för termitsvetsning, vilket resulterat i minskat antal spårskador.

En jämförelse mellan termitsvetsning och brännsvetsning har gjorts i USA i avseendet tung last. Resultatet redovisas i Tabell 10.

Tabell 10. Andelen rälsskador orsakade av rälskarven vid termitsvetsning respektive brännsvetsning vid olika axellast. Undersökning är utförd år 1990 på TTCL i Pueblo, Colorado, USA. Observera att teknologin för termitsvetsning har förbättrats avsevärt sen undersökningen utfördes. [2]

Axellast	Andelen rälsskador orsakade av rälskarven vid termitsvetsning [%]	Andelen rälsskador orsakade av rälskarven vid brännsvetsning [%]
30 ton (efter bruttotonnaget 59 miljoner ton)	29	3
36 ton (efter bruttotonnaget 59 miljoner ton)	67	5

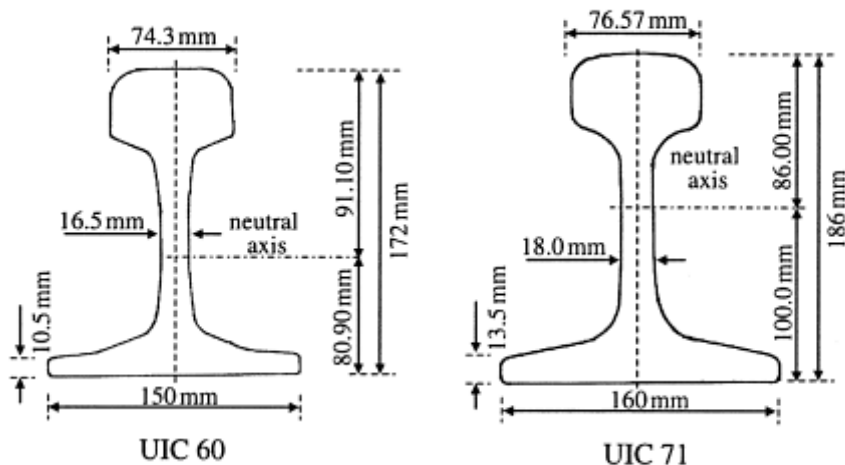
Tabell 10 ovan indikerar tydligt på att bränsvetsning är att föredra vid tunga laster för att minimera antalet rälskador.

5.1.7 Rälprofil

På Malmbanan finns i dagsläget rälprofilerna 50E3 och 60E1. Av dessa är rälprofilen 60E1 att föredra vid höga axellaster eftersom den har en högre metervikt och större tvärsnittsarea. Fördelarna med en större och tyngre rälprofil vid tunga godstransporter listas nedan. [18] [29]

- Minskat antal rälskador
- Minskad spårnedbrytning
- Högre vikt upprätthåller spårläget
- Minskad risk för rälsbrott
- Fler möjliga slipningskampanjer innan maximalt tillåten slitagegräns uppnås

En ytterligare större rälprofil än 60E1 skulle därför vara fördelaktig. Detta skulle förslagsvis kunna vara rälprofil 71E1 med en metervikt på 71 kg/m. [30]



Figur 21. Tvärsnittet på rälprofil UIC60 (60E1) jämfört med UIC 71 (71E1) [30]

5.1.8 Isolerskarvar

Isolerskarv definieras som en rälskarv med ett tunt mellanlägg. Där mellanlägget är av ett elektriskt isolerande material. Isolerskarven används för att förhindra spårledningsströmmen att gå från den ena räländan till den andra, dvs. avgränsar spårledningens utbredning i rälen. Dess uppgift är även att isolera rälen genom växlar. En isolerskarv i ett helsvetsat spår utsätts för längsgående krafter och även rörelser på grund av temperaturvariationer. [3]

Vid en ökad axellast kommer isolerskarven utsättas för en ökad belastning, vilket resulterar i ökat slitage och övervalsning. [18] Nödvändigt underhåll kan då vara stoppning och justering. Påläggsvetsning och uppbockning kan även vara nödvändigt. [3]

Vid införandet av STAX 32,5 och uppåt bedöms limmade 6-håls isolerskarvar vara lämpligast, eftersom dessa ger ett minskat slitage och därmed minskat underhållsbehov. På sikt bör därför samtliga isolerskarvar bytas ut till limmad 6-håls i syfte att klara av framtida axellastökningar. I *Bilaga 7 - Isolerskarvar längs Malmbanans södra omlopp* i avsnitt 9.7 presenteras de typer av isolerskarvar som finns längs Malmbanans södra omlopp i dagsläget.



Figur 22. En limmad 6-håls isolerskarv på Malmbanan.

5.1.9 Växlar

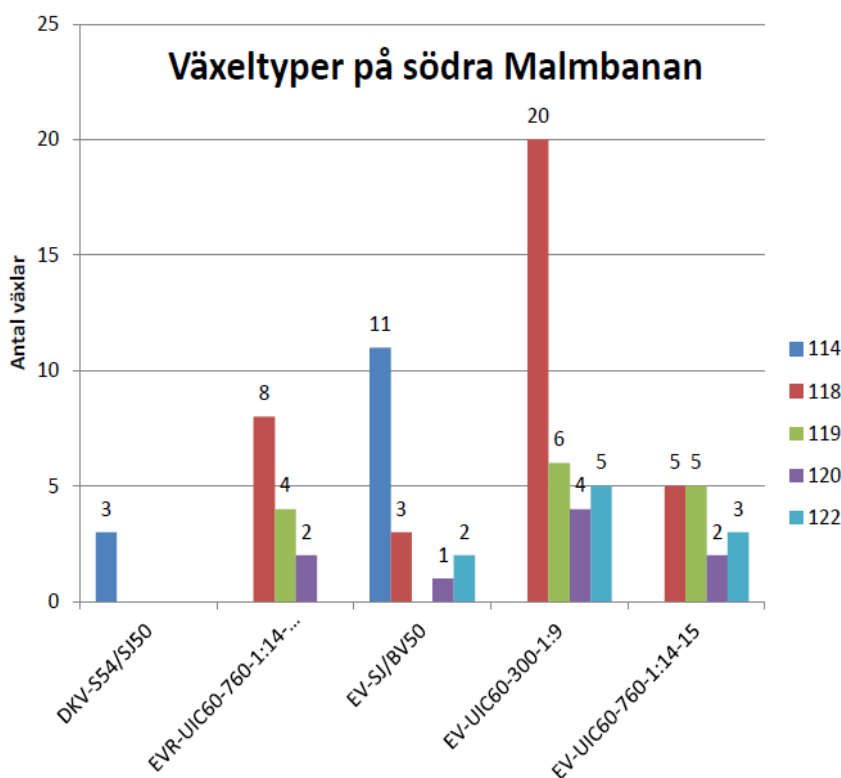
Malmbanans höga axellast ställer stora krav på spårväxlarna, som utsätts för en ökad belastning och därmed större slitage. Tidigare har en växeltyp med fast korsningsspets använts, men på senare år har växlar med rörlig korsningsspets implementerats. Detta resulterar i mindre slitage på växeln och vagnens hjul. Nackdelarna är högre investeringskostnad och risk för potentiella driftstörningar. [22]

5.1.9.1 Fast och rörlig korsningsspets



Tunganordningen är densamma för både fast och rörlig korsningsspets. Den består av växeltungan, som är den rörliga delen, och stödrälen, som är den stationära delen av växeln. Växeltungan styr in tåget på ett sidospår. [3] Skillnaden ligger i korsningen, där en rörlig korsningsspets är omlägningsbar i vingrälen, se Figur 23. Hjulet har därför kontakt med rälen genom hela växelpassagen. Detta gör att slitaget mellan hjul och räl minskar avsevärt, eftersom hjulet inte behöver "kliva över" korsningen som är fallet vid fast korsningsspets. Även moträlen förlorar sin funktion och kan därför tas bort. [22]

Figur 23. En växel med rörlig korsningsspets.



Figur 24. Växeltyper på södra Malmbanan år 2013. EVR är benämningen för växel med rörlig korsningsspets. [18] Arbetet pågår med att ersätta samtliga växlar med fast korsningsspets till växlar med rörlig korsningsspets. Detta då växlar med rörlig korsningsspets kräver avsevärt mindre underhåll. [15]

5.2 RÄLSBEFÄSTNINGAR

Rälsbefästningens huvudsakliga uppgift är att behålla läget av rälsen, så att spårvidden och spårläget inte ändras av belastningar från spårtrafiken. Befästningen behöver även överföra de krafter som verkar på och i rälen till slipers och underbyggnaden. Det är också viktigt att den har ett vertikalt

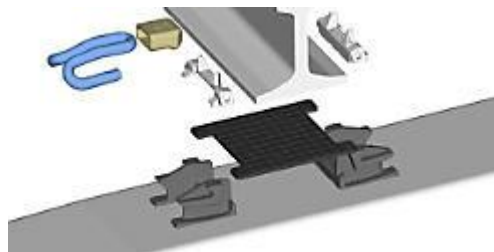
motstånd, speciellt när betongslipers används. Dessutom behöver de även vara elektriskt isolerade för att inte de elektriska signalerna går ut i underbyggnaden. [2] [3]

Enligt standarden SS-EN 13481-8:2006 (Prestandakrav för befästningssystem för spår med hög axelbelastning), som anger kraven för axellaster upp till 350 kN och kurvradie på minst 80 m, krävs ett rälsvandringmotstånd på minst 9 kN. Trafikverket har krav av förmonterade befästningar för axellaster om 30 ton och högre att rälsvandringmotståndet, likt SS-EN, ska vara minst 9 kN, dämpningen av stötkrafter behöver vara i storleksordningen 30-40% och mellanläggets styvhet ska vara i storleksordningen 100 MN/m. [14]

5.2.1 Mellanläggsplatta

Mellanläggsplattan är en platta som ligger mellan slipern och rälsen, plattan är till för att dämpa högfrekventa vibrationer och krafter från hjul-räl kontakten. Mellanlägget ska bidra med elasticitet och utge ett jämnt tryck över kontaktytan mellan plattan och slipern. Plattorna är ungefär 5-10 mm tjocka och är gjorda av gummi eller plast. Styvheten för mellanläggen är kraftigt beroende på temperaturen, vid låga temperaturer försämras elasticiteten. [3]

I nuläget används framförallt gummimellanlägg men finns även en del plastmellanlägg. Inför axellasthöjningar bör gummimellanläggen bytas ut mot plastmellanlägg utav polyuretan (PU) eller polyeten med hög densitet (HDPE). [14] [31]



Figur 25. Mellanläggsplattan kan skådas som den svarta detaljen i figuren. [48]

5.2.2 Typ av rälsbefästning

Den rälsbefästning som till störst utsträckning finns på Malmbanan i dagsläget är Pandrol e-Clips av olika versioner, dock är endast e1817 modellen identifierbar. Utöver de vanliga e-Clips finns även Pandrol Fastclip och e-Clips Deep Post. Det finns även Heyback befästningar på de korta sträckor som fortfarande har träslipers. En komponentinventering bör ske på sträckan för att säkerställa befästningsmodell och dess position.

Enligt Pandrol, som tillverkar alla befästningar som används förutom Heyback, ska Fastclip (FC1600) och de starkaste e-clip (e-Plus/e2000) vara de som klarar axellaster över 32,5 ton på både rakspår

och i kurvor. Ifall befästningen har PU/HDPE mellanlägg ska dessa befästningar klara axellaster upp till STAX 40. Befästningarnas egenskaper framgår i Tabell 11 nedan.

De andra befästningssystemen har en klämkraft på 7,5 kN för Heyback och åtminstone 9 kN för resterande e-Clips vilket ska ge ett rälsvandringmotstånd på >7 kN. Dessa befästningar anses vara tillräckliga för tåggång vid STAX 32,5 så länge de inte förekommer i snäva kurvor. För högre axellaster, STAX 35 och högre, bör samtliga befästningar bytas mot Fastclip och starkare e-Clip för rakspår.

Tabell 11. Trafikverkets krav för förmonterade befästningar för axellaster om 30 ton och e-Plus/e2000 och FC1600 befästningarnas egenskaper. [14] [31]

	Krav Trafikverket	e-Plus/e2000 gummi- mellanlägg	e-Plus/e2000 PU/HDPE mellanlägg	FC1600 Gummi- mellanlägg	FC1600 PU/HDPE mellanlägg
Rälsvandring- motstånd	9 kN	>9 kN	>9 kN	>9 kN	>9 kN
Dämpning av stötkrafter	30-40%	>30%	N/A	>30%	N/A
Mellanläggets styvhet	100 MN/m	>100 MN/m	>300 MN/m	>100 MN/m	>300 MN/m

Vid axellaster upp mot STAX 37,5 – 40 kan ännu kraftigare befästningar övervägas, speciellt i snäva kurvor men även för att öka livslängden för befästningssystemet. Ett exempel på starkare befästningssystem är Pandrol Fastclip FE RR. [14] [31] [32]

- 1 Clip
- 2 Insulator
- 3 Rail Pad
- 4 Shoulder



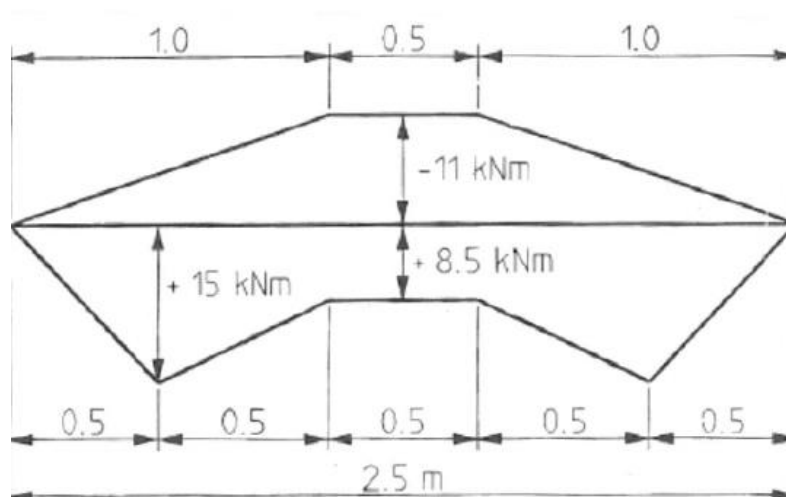
Figur 26. Befästning av typen Pandrol e-Clip till vänster och Pandrol Fastclip till höger. [31]

5.3 SLIPERS

Sliperns uppgift är att överföra den kraft som appliceras på rälen till ballasten. Den håller även fast rälen i ett stationärt läge, vilket gör att spårläget och spårvidden upprätthålls. Slutligen är den även delaktig i att absorbera horisontalkrafter orsakade av förbipasserande tåg och temperaturskillnader. [3]

På Malmbanan används idag till största delen betongsliprar. Det är endast en sträcka på bandel 114 mellan Gällivare och Koskullskulle som fortfarande har träslipers, samt vissa mötesstationer. Fördelen med betongslipers är att de har längre livslängd, lågt inköpspris och att en högre slipervikt ger högre motstånd mot laterala förflyttningar. Detta bidrar till att spårläget upprätthålls. [2]

Beräkningar på vilken belastning slipern kommer att utsättas för vid en ökning av axellast presenteras nedan. Beräkningarna görs på betongslipers (se Tabell 5), 600 mm slipersavstånd och rälsprofilen UIC 60. Slipermodell A22 som är tillverkad för STAX 35 har ett dimensionerande böjmoment i rälläget på 22kNm och ett böjmoment i slipermitt på -14 kNm vid hastigheten 80 km/h. [14]



Figur 27. Det maximalt tillåtna böjmomentet på betongsliprar för slipermodell S3 och S7. [34]

Förutom att uppta de statiska och dynamiska lasterna måste slipern klara utmattning och ogynnsamma förutsättningar såsom korrosion eller tågpassage med hjulplattor. En annan frågeställning är hur mycket livslängden förkortas när axellasten ökas. [33] Detta tas inte hänsyn till, utan endast att slipern kan uppta de statiska och dynamiska lasterna för respektive axellast beaktas i följande beräkningar.

Tabell 12. Maximalt tillåtet böjmoment i rälläget respektive slipermitt för slipermodell S3 och S7 respektive A9, A13 och A22. [14] [34]

Slipermodell	Maximalt böjmoment i rälläget	Maximal böjmoment i slipermitt
S3, S7	15 kNm	-11 kNm
A9, A13, A22	22 kNm	-14 kNm

Det finns i dagsläget inte något maximalt böjmoment för respektive slipermodell från Trafikverket. I denna rapport görs antagandet att slipermodell A9, A13 och A22 har ett maximalt tillåtet värde på -14 kNm i slipermitt, vilket ger säkerhetsfaktorn 1,9 för A9 respektive 2 för A13. I rälläget ger gränsvärdet 22 kNm säkerhetsfaktorn 1,6 för A9 respektive 1,85 för A13. [14] Slipermodell S3 och S7 bedöms ha ett maximalt tillåtet böjmoment på -11 kNm i slipermitt och 15 kNm i rälläget, enligt Figur 27. [34] Dock saknas hållfasthetsprov från slipermodellerna S3 och S7. Trafikverket bör utföra hållfasthetsprov på samtliga slipermodeller, samt bestämma brottmomentet. På så sätt kan ett maximalt tillåtet böjmoment bestämmas för varje enskild slipermodell med en säkerhetsfaktor mot brott på 1,75.

5.3.1 Spänningen i kontaktytan mellan räl och sliper

Den maximalt tillåtna spänningen mellan rälsfoten och slipern (rälläget) är $\sigma_{max} < 60 \text{ MPa}$ för betongsliper. [14] Den maximala spänningen i rälläget för betongsliper av typen S7 vid olika axellaster presenteras i Tabell 13. Maximalspänningen ges av:

$$\sigma_{max} = \frac{Q}{A} \quad (14)$$

Där Q är den effektiva hjullasten, se Ekvation (7), och A är kontaktarean mellan rälsfoten och slipern.

Beräkningarna av spänningen i rälläget vid STAX 30 finns i *Bilaga 3 - Beräkning av kontaktspänningen mellan rälsfot och sliper på betongslipers av typen S7 för STAX 30* i avsnitt 9.3.

Tabell 13. Den maximala spänningen mellan rälsfot och betongsliper av typen S7. Endast den statiska lasten beaktas.

Axellast	Maximalspänning mellan rälsfot och betongsliper av typen S7
STAX 30	6,6 MPa
STAX 32,5	7,1 MPa
STAX 35	7,6 MPa
STAX 37,5	8,2 MPa
STAX 40	8,7 MPa

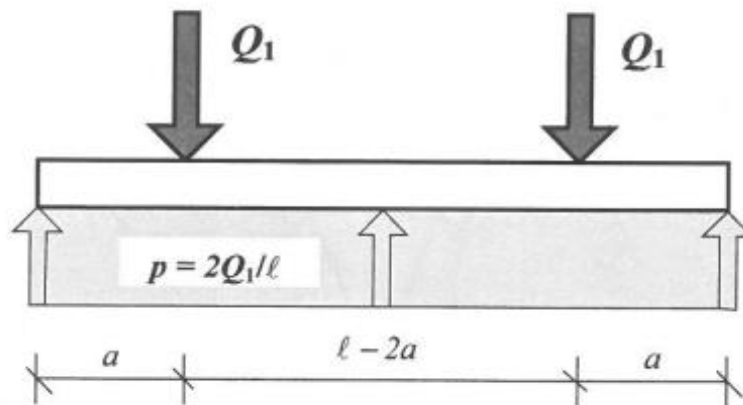
Maximalspänningen även för en axellast på STAX 40 är inte i närheten av det maximalt tillåtna gränsvärdet, enligt Tabell 13.

I beräkningarna har endast den statiska axellasten beaktats. Det kommer även att behöva tilläggas en dynamisk last i storleksordningen 30 % av den statiska hjullasten, se avsnitt 3.2. Även med detta tillägg kommer maximalspänningen inte vara i närheten av gränsvärdet. I dessa beräkningar tas inte heller hänsyn till kraftfördelningen mellan sliprarna, enligt Figur 29. Detta betyder att spänningen i rälläget är ännu mindre än i beräkningarna ovan.

De övriga slipermodellerna på Malmbanan (S3, A9, A13, A22) har liknande kontaktarea mellan rälsfoten och slipern. Detta betyder att även dessa ligger långt ifrån gränsvärdet på $\sigma_{max} < 60 \text{ MPa}$ för axellaster upp till STAX 40.

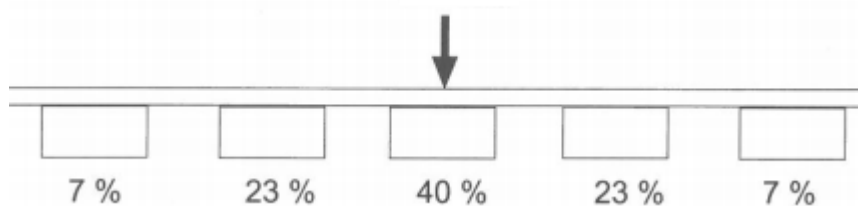
5.3.2 Böjhållfasthet

Kraftmomentet på slipern beror på kraften applicerad från hjullasten, mellanläggets kraftutbredning och ballastfördelningen. I beräkningarna nedan antas en jämn kraftfördelning från ballasten. Kraften från en räl som belastar en enskild sliper betecknas Q_1 och sliperlängden betecknas ℓ , enligt Figur 28 nedan. [22]



Figur 28. Applicerad kraft från hjullasten på slipern, samt avståndet från sliperkant till rärläget. [22]

Axellasten fördelas mellan sliprarna, där den maximalt belastade slipern precis under hjulet tar ungefär 40 % av den totala axellasten, enligt Figur 29.



Figur 29. Kraftfördelningen på närliggande sliprar. [2]

Meterkraften på slipern:

$$p = \frac{Q_{sliper}}{\ell} = \frac{2Q_1}{\ell} \quad (15)$$

Där Q_{sliper} är kraften applicerad på en enskild sliper.

5.3.2.1 Böjhållfasthet i rälläget

Momentet i rälläget: [22]

$$M_s = \frac{pa^2}{2} \quad (16)$$

Där p är meterkraften på slipern, enligt Ekvation (15).

Beräkningen av böjmomentet i rälläget för STAX 30 visas i *Bilaga 4 - Beräkning av böjmomentet i rälläget* och slipermitt för STAX 30 i avsnitt 9.4.

Böjmomentet i rälläget för de olika axellasterna vid statisk hjullast presenteras i Tabell 14.

Tabell 14. Maximalt moment i rälläget för olika axellast. (Statisk hjullast)

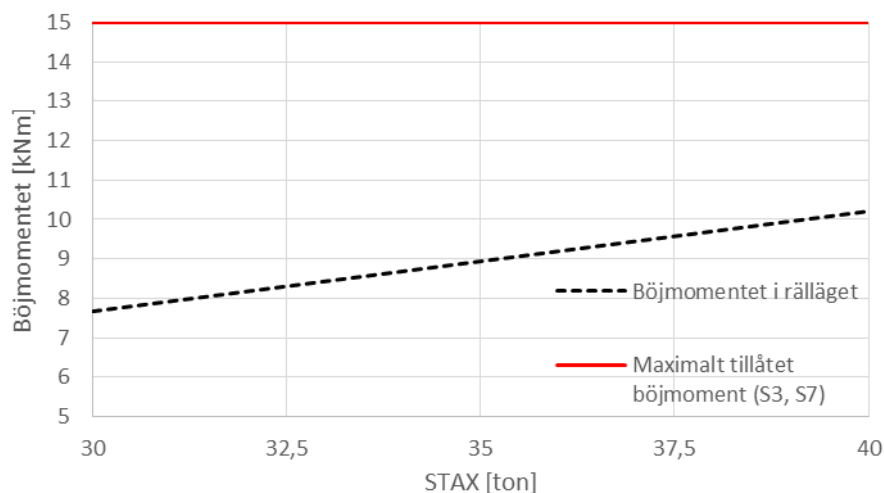
Axellast	Maximalt moment i rälläget (Statisk hjullast)
STAX 30	5,89 kNm
STAX 32,5	6,38 kNm
STAX 35	6,87 kNm
STAX 37,5	7,36 kNm
STAX 40	7,85 kNm

Maximalt tillåtna böjmomentet i rälläget för betongslipers av typen S3 och S7 är $M_s < 15 \text{ kNm}$, enligt Tabell 12. Ingen av axellasterna ovan överstiger denna gräns. Det dynamiska tillskottet är ungefär 30 % av den statiska hjullasten, se avsnitt 3.2. Det maximala böjmomentet i rälläget, med även det dynamiska tillskottet inkluderat, presenteras i Tabell 15.

Tabell 15. Maximalt moment i rälläget för olika axellast. (Statisk + Dynamisk hjullast)

Axellast	Maximalt moment i rälläget (Statisk + Dynamisk hjullast)
STAX 30	7,66 kNm
STAX 32,5	8,29 kNm
STAX 35	8,93 kNm
STAX 37,5	9,57 kNm
STAX 40	10,21 kNm

Böjhållfastheten i rälläget (Statisk + Dynamisk)



Figur 30. Det maximala böjmomentet i rälläget (Statisk + Dynamisk hjullast) för olika axellaster. Det röda strecket indikerar det maximalt tillåtna böjmomentet för S3 och S7 betongsliprar, enligt Tabell 12.

Inte heller vid maximalt moment (statisk + dynamisk hjullast) för STAX 40 överskrids gränsvärdet, se Figur 30. Givetvis överskrids inte heller gränsvärdet på böjmomentet för betongslipers A9, A13 och A22, se Tabell 12. Enligt antagandet som gjorts skulle därför samtliga betongslipers klara STAX 40 i avseendet på den maximala böjspänningen i rälläget.

5.3.2.2 Böjhållfasthet i slipermitt

Böjmomentet på slipermitt ges av följande. [22]

$$M_f = M_s - \frac{p(\ell - 2a)^2}{8} \quad (17)$$

Där M_s är böjmomentet i rälläget, enligt Ekvation (16), p är meterkraften på slipern, enligt Ekvation (15) samt ℓ och a är sliperlängden respektive avståndet från sliperkant till rälläget, enligt Figur 28.

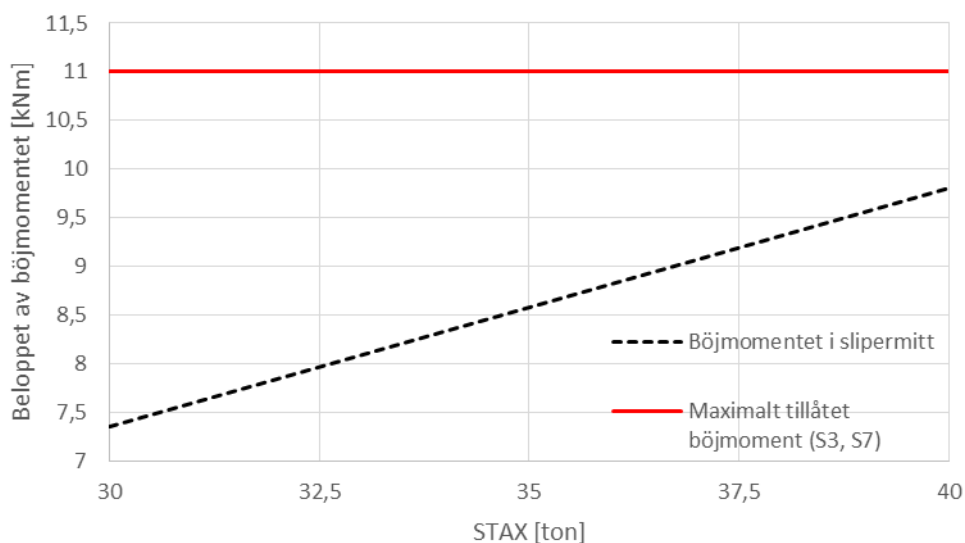
Beräkningen av böjmomentet i slipermitt för STAX 30 visas i *Bilaga 4 - Beräkning av böjmomentet i rälläget och slipermitt för STAX 30* i avsnitt 9.4.

Böjmomentet i slipermitt för de olika axellasterna vid statisk hjullast presenteras i Tabell 16.

Tabell 16. Maximalt böjmoment i slipermitt för olika axellaster. (Statisk hjullast)

Axellast	Maximalt böjmoment i slipermitt (Statisk hjullast)
STAX 30	-7,36 kNm
STAX 32,5	-7,97 kNm
STAX 35	-8,58 kNm
STAX 37,5	-9,19 kNm
STAX 40	-9,81 kNm

Böjhållfasthet i slipermitt (Statisk)

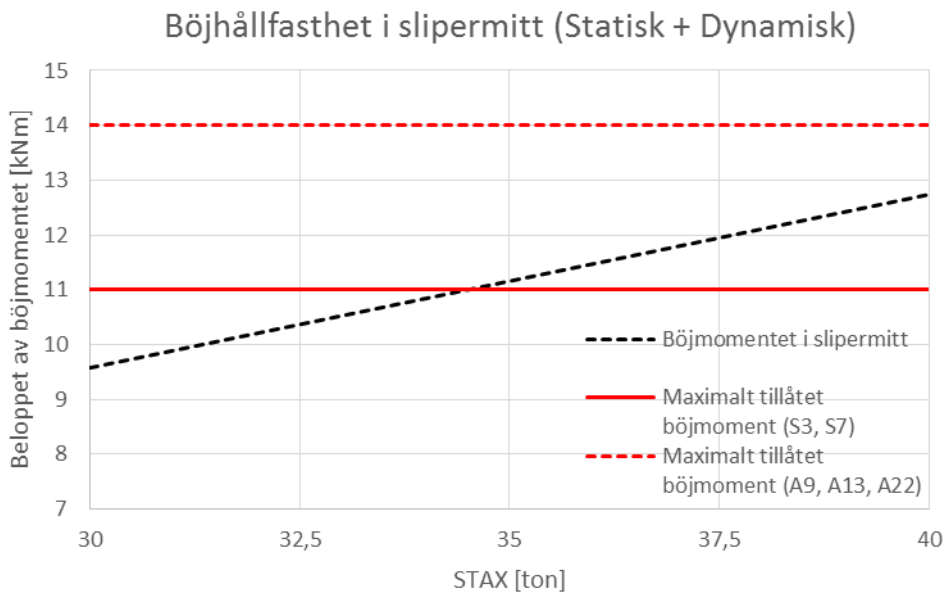


Figur 31. Det maximala böjmomentet i slipermitt (Statisk hjullast) för olika axellaster. Endast statisk hjullast beaktas, vilket är representativt för mötesstationer och bangårdar. Det röda strecket indikerar det maximalt tillåtna böjmomentet för S3 och S7 betongsliprar, enligt Tabell 12.

Det maximalt tillåtna böjmomentet i slipermitt för betongslipers S3 och S7 är enligt antagandet $M_s < -11 \text{ kNm}$, enligt Tabell 12. Betongslipers av typen A9, A13, A22 har ett maximalt böjmoment på $M_s < -14 \text{ kNm}$, se Tabell 12. Böjmomentet i slipermitt överstiger således inte det maximalt tillåtna momentet för någon av axellasterna. Dock befinner sig de tyngre axellasterna relativt nära gränsvärdet för S3 och S7. Hänsyn måste därför även tas till det dynamiska tillskottet, som i detta arbete valts till 30 % av den statiska hjullasten, se avsnitt 3.2. Böjmomentet för axellasterna, då även den dynamiska hjullasten har beaktats, presenteras i Tabell 17.

Tabell 17. Maximalt böjmoment i slipermitt (Statisk och dynamisk hjullast) för olika axellaster.

Axellast	Maximalt böjmoment i slipermitt (Statisk hjullast + dynamisk hjullast vid 60 km/h)
STAX 30	-9,57 kNm
STAX 32,5	-10,36 kNm
STAX 35	-11,15 kNm
STAX 37,5	-11,95 kNm
STAX 40	-12,75 kNm



Figur 32. Det maximala böjmomentet i slipermitt (Statisk + Dynamisk hjullast) för olika axellaster. Det streckade respektive heldragna röda strecken indikerar det maximalt tillåtna böjmoment för A9, A13 och A22 betongslipers respektive S3 och S7 betongslipers, enligt Tabell 12.

Detta betyder att det maximala böjmomentet i slipermitt överstiger det tillåtna gränsvärdet på S3 och S7 ($M_f < 11 \text{ kNm}$) för STAX 35 och högre, se Figur 32. Om endast den statiska hjullasten beaktas överstigs inte gränsvärdet, vilket betyder att STAX 40 skulle kunna vara möjlig på bangårdar där hastigheten är låg, se Figur 31. Detta skulle kunna vara möjligt för samtliga betongslipers. Däremot skulle gränsvärdet överstigas ute på banan för S3 och S7, där hastigheten ligger runt 60 km/h.

För en ökning av axellasten till STAX 32,5 behöver inga åtgärder göras på sliperarna, enligt Figur 32. Den totala livslängden kan däremot minska något, men detta beror snarare på trafikvolymen än största tillåtna axellast. Däremot vid en fortsatt ökning till STAX 35 och högre måste samtliga betongslipers av slipermodell S3, S7 bytas ut, förslagsvis till slipermodell A22. Slipermodell A9, A13 och A22 bedöms vara godkända för STAX 35, enligt Figur 32 och Tabell 12.

Enligt Figur 32 kommer slipermodell A9, A13 och A22 vara dugliga för STAX 40. Dock minskar livslängden med högre axellaster. Detta medför att slipermodell A9, som började läggas 1989, antagligen kommer att behöva bytas ut stegvis vid STAX 37,5. För att STAX 40 ska vara möjligt på Malmbanan bedöms samtliga slipers, utom slipermodell A22 och A13, behöva bytas ut. De gamla sliperarna skulle då lämpligtvis ersättas med A22 eller mot en ännu hållfastare slipermodell.

5.3.3 Träslipers

Idag finns det endast träslipers kvar på en sträcka av bandel 114 mellan Gällivare och Koskullskulle och på vissa mötesstationer. Träsliperarna är från 1981 och ligger i relativt förorenad ballast. De består av både furu och bokträ med en tryckhållfasthet på 7 MPa respektive 9 MPa tvärs fiberriktningen. [14] En säkerhetsfaktor mot brott på $\sigma_{säkerhet} \geq 1,75$ ger att den maximalt tillåtna spänningen mellan underläggsplattan och träsliperarna blir $\sigma_{till,furu} = 4 \text{ MPa}$ för träslipers av furu och $\sigma_{till,bok} \approx$

5,1 MPa för träslipers av bokträ. På sträckor med träslipers är STH 40 km/h, vilket betyder att det dynamiska tillskottet kommer att vara lägre än tidigare beräknat. Ekvation (1) och (2) ger det dynamiska tillskottet på bandel 114 enligt följande.

$$Q_{tot} \approx 1,26Q_{stat} \quad (18)$$

Den maximala spänningen i kontaktytan mellan underläggsplattan som rälen vilar på och slipern ges av Ekvation (19).

$$\sigma_{max} = \frac{Q}{A} \quad (19)$$

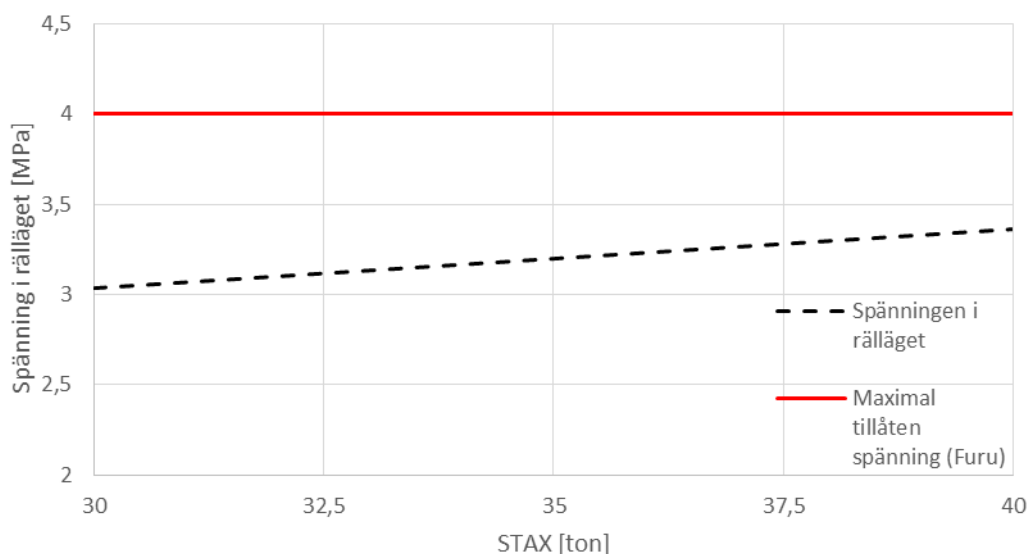
Där A är kontaktarean och Q är den effektiva hjullasten.

Beräkningen av spänningen i rälläget på träslipers för STAX 30 visas i *Bilaga 5 - Beräkning av kontaktpänningen mellan underläggsplattan och träslipern för STAX 30* i avsnitt 9.5. Den maximala spänningen i kontaktytan mellan underläggsplattan och slipern presenteras i Tabell 18. I dessa beräkningar har även det dynamiska tillskottet för en hastighet på 40 km/h beaktats. I Figur 34 och Figur 33 visas den maximala spänningen i rälläget vid 40 km/h respektive vid låga hastigheter, där det dynamiska tillskottet försummas.

Tabell 18. Maximalspänning i rälläget på träslipers för olika axellaster. (Statisk + Dynamisk)

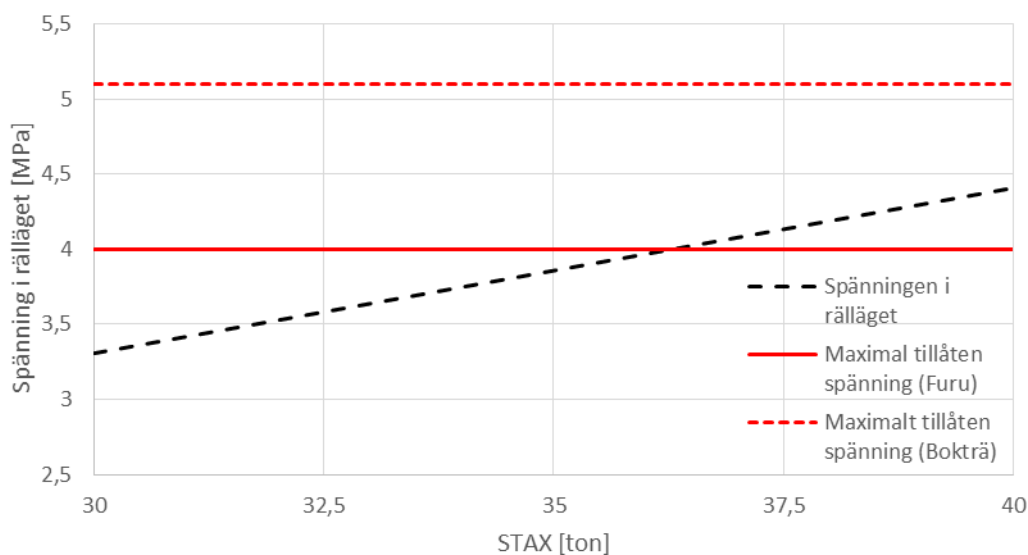
Axellast	Maximalspänning mellan underläggsplattan och slipern
STAX 30	3,3 MPa
STAX 32,5	3,6 MPa
STAX 35	3,9 MPa
STAX 37,5	4,1 MPa
STAX 40	4,4 MPa

Maximalspänning i rälläget på träslipers (Statisk)



Figur 33. Maximalspänningen i rälläget (Statisk hjullast) med avseende på STAX. Endast statisk hjullast beaktas, vilket är representativt för mötesstationer och bangårdar. Det röda strecket indikerar maximalt tillåten spänning i rälläget för träslipers av furu.

Maximalspänning i rälläget på träslipers



Figur 34. Maximalspänningen i rälläget (Statisk + Dynamisk hjullast) med avseende på STAX. Det heldragna respektive streckade röda strecket indikerar maximal tillåten spänning i rälläget för träslipers av furu respektive bokträ.

Tabell 18 och Figur 34 visar att den maximala kontaktspänningen mellan underläggsplattan och slipern kommer att överstiga det maximalt tillåtna spänningen för träslipers av furu för STAX 37,5 och uppåt. Detta betyder att träsliprarna skulle kunna behållas upp till STAX 35. Vid högre axellaster måste definitivt träslipers av furu bytas ut, men förslagsvis också träslipers av bokträ. Bytet sker

lämpligtvis till betongslipers av typen A22. Vid en axellastökning kommer naturligtvis livslängden att förkortas. Träsliprarna som ligger på huvudspår har redan uppnått en viss ålder (togs i bruk 1981) och nedbrytningen kommer att påskyndas ytterligare vid en ökad belastning. Med detta i hänsyn rekommenderas att träslipers kan användas för STAX 32,5, men bör bytas ut till STAX 35 och högre. Dessutom måste malmtågen sänka hastigheten till 40 km/h på bansträckan med träslipers, vilket ger längre omloppstid. Även detta är ett argument för ett byte till betongslipers bör ske relativt omgående. På mötesspår och bangårdar där det dynamiska tillskottet är lägre bedöms träslipers vara dugliga ända upp till STAX 40, enligt Figur 33.

5.4 BALLAST

Ballastens funktion är att uppta det höga trycket från slipern och sprida ut det till banundergrunden. Utöver detta behöver ballasten uppfylla dessa krav [2]:

- Bibehålla sliperns laterala och longitudinella position
- Elastiserande egenskaper för att minimera dynamiska krafter i spåret
- Dränerande egenskaper

Ballastdjupet är avståndet mellan den undre ytan på slipern ned till underballasten och dimensioneras av sliperavstånd, sliperbredd och inre friktion i ballasten. Ballastmaterialet ska vara vädertåligt och tåla att bli utsatt för ett högt tryck. Det måste även vara elastisk, vilket ger lägre slitage på rälen och sliprarna. Elasticiteten sker då ballastkornen vid tågpassage rör sig inbördes och därmed nöts mot varandra. Ballasten ska också ha dränerande egenskaper, vilket medför att bankroppen inte blir stum vid tjäle. [3]

Vid en ökad axellast utsätts ballasten för en högre belastning. Detta medför en ökad nedkrossning, vilket kommer att minska bärigheten. [16] Banunderbyggnaden kommer även att utsättas för stora rörelser, resulterande i en påskyndad ballastförorening då mer finmaterial pumpas upp från undergrunden upp i ballasten. [18]

5.4.1 Föroreningar och underhåll

På Malmbanan finns det tre huvudsakliga föroreningar av ballasten. Den första är att det finns så kallade skvättsträckor, där vatten står högt upp i bankroppen och finmaterial pumpas in från underballasten, se Figur 7. Den andra är att det spills pellets och slig från vagnarna, vilket beblandas med ballasten och försämrar bärigheten. Ökade axellaster kommer även att medföra tilltagande nedkrossningen av ballast. Nedbruten ballast beblandad med vatten bildar lera, vilket är ytterligare en orsak till ballastförorening. [35] Den höga föroreningsgraden gör att ballastrening bör utföras, det vill säga finmaterial plockas bort och endast makadammet blir kvar. [16] [18] En ballastrening medför



Figur 35. En ballastrening. [36]

förbättrad dräneringsförmåga. En dålig ballastdränering ökar risken för frostbildning, vilket skulle leda till försämrad spårstyvhet. [36]

Att ballastrening utförs regelbundet är även viktigt i avseendet att minska nedbrytningen på slipern. Detta eftersom en förorenad ballast ger dålig bärighet under slipern, vilket kommer att leda till ökad påfrestning på slipern vid tågpassage. Sprickbildning och eventuellt brott av slipern riskerar då att ske i framför allt slipermitt, se avsnitt 5.3.2.2. Ett ytterligare alternativ för att motverka sprickbildning i slipern är att implementera en slipermodell med större tvärsnitt. [37]

Ballastrening går till på följande sätt: [2]

- En kedja gräver upp makadamballasten
- På vibrationsplattor sorteras över- och underdimensionerade makadamstenar bort.
- Makadamstenar med rätt dimensioner återanvänds.

5.4.2 Slipermattor och ballastmattor

Slipermattor är en sorts mellanläggsplatta som placeras mellan slipern och ballasten. Tjockleken är mellan 10-20 mm och har på senare år börjat användas, främst på höghastighetsbanorna i Europa. Den består ofta av polyuretan och limmas fast på undersidan av slipern. [4]

Det finns två huvudsakliga syften, varav det första är att minska kontakttrycket mellan sliper och ballast. En mjuk slipermatta ger en bättre anpassning till ballaststenarna, som kan pressas in i mellanläggsplattan. Detta leder till en ökad kontaktyta mellan slipern och de bärande ballaststenarna. Utan slipermattor är kontaktarean mellan ballast och sliper ungefär 3-4 % av sliperarean, men med slipermattor är motsvarande area ungefär 30 %. Detta leder till ett minskat kontakttryck och därmed minskat nötning mellan ballaststenarna. Även det optimala ballastdjupet kommer att minskas, då kraftspridningen är större redan i övergången mellan sliper och ballast, se avsnitt 5.4.4. Slipermattor bidrar även till att tågbelastningen sprids ut på fler sliprar, se avsnitt 5.3.2. Även detta bidrar till mindre ballastnedbrytning och minskad sättningshastighet av bankroppen. [4]

Det andra syftet med slipermattor är att minska förändringen av spårstyvhet. Spårstyvheten kan förändras markant på endast ett fåtal meter, eftersom spåret sällan är beläget på en homogen banundergrund. Detta gör att spårstyvheten förändras längs spåret. Syftet med slipermattor är därför att ge en mjukare förändring. En mjukare förändring leder till ett mindre dynamiskt tillskott, vilket minskar spårkrafterna och därmed spårnedbrytningen, se avsnitt 3.2. Speciellt utsatta platser är övergången till broar, som ofta har en högre spårstyvhet än resten av banan. För att minska spårnedbrytningen är det därför viktigt att slipermattor implementeras på dessa platser. [4] [7]

Vid nyläggning av sliprar kommer slipermattor att installeras på Malmbanan, detta främst för en mjukare förändring i spårstyvheten och därmed minskad spårnedbrytning. [15]

Ett annat alternativ för att minska förändringen av spårstyvhet är att lägga ballastmattor. Dessa har tidigare främst används i syfte att minska belastningen på banundergrunden, samt att förhindra att vibrationer sprids från banvallen ned i banundergrunden. Dock har det konstaterats att ballastmattor även minskar förändringen av spårstyvhet längs spåret, vilket ger en dämpande effekt på det dynamiska tillskottet. [38]

5.4.3 Trycket i kontaktytan mellan sliper och ballast

Ballasttrycket p kan beräknas enligt Ekvation (20) nedan. [3]

$$p = 0,6Q \sqrt[4]{\frac{a^3 C}{F^3 EI}} \quad (20)$$

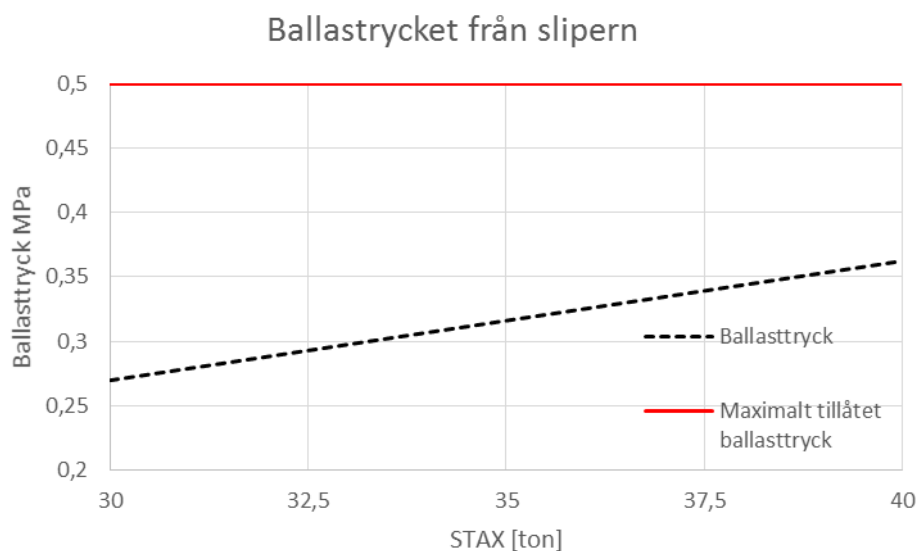
Där Q är hjullasten, a är sliperavståndet, F är bärande yta på slipern (hälften per räl), C är bäddmodulen, E stålets elasticitetsmodul och I är tröghetsmomentet per räl.

Beräkningen av ballasttrycket för STAX 30 visas i *Bilaga 6 - Beräkning av trycket i kontaktytan mellan slipers och ballast för STAX 30* i avsnitt 9.6. I beräkningarna antas ett idealiserat system, där ett jämnt tryck överförs från sliperarean ned i ballasten. I verkligheten är endast 3-4 % av sliperarean i kontakt med kraftbärande ballaststenar. Om sliper mattor används kan nämnda area ökas till ungefär 30 %, se avsnitt 5.4.2. Detta gör att beräkningarna inte är helt verklighetstroga, men de är trots allt en bra uppskattning av hur ballasttrycket ökar med ökad axellast.

Ballasttrycket från slipern ökar linjärt med axellasten, enligt Tabell 19 och Figur 36.

Tabell 19. Ballasttrycket från slipern med avseende på axellasten.

Axellast	Ballasttryck
STAX 30	0,27 MPa
STAX 32,5	0,29 MPa
STAX 35	0,32 MPa
STAX 37,5	0,34 MPa
STAX 40	0,36 MPa



Figur 36. Ballasttrycket med avseende på axellasten. Det röda strecket indikerar maximalt tillåtet ballasttryck [23].

Ekvation (20) ovan beskriver att ballasttrycket kommer att minska med minskat sliperavstånd, lägre bäddmodul, ökad sliperarea och ökad rälsstyvhets. Ett högt ballasttryck medför en påskyndad nedbrytning av ballasten. Ballastens styvhets är svår att påverka. Däremot inkluderar bäddmodulen även styvhets såsom mellanläggets och sliperns styvhets, vilka kan modifieras för att finna ett optimalt ballasttryck. [3]

Enligt [23] är det maximalt tillåtna ballasttrycket på 0,5 MPa. Detta är enligt antagandet att sliperarean överför ett jämnt tryck till ballasten. Enligt Tabell 19 och Figur 36 överstigs inte det maximalt tillåtna ballasttrycket ens för STAX 40. Dock kommer givetvis ballastens nedkrossning att öka med en ökad axellast, men detta beror mer på trafikvolym än tyngden på axellasten.

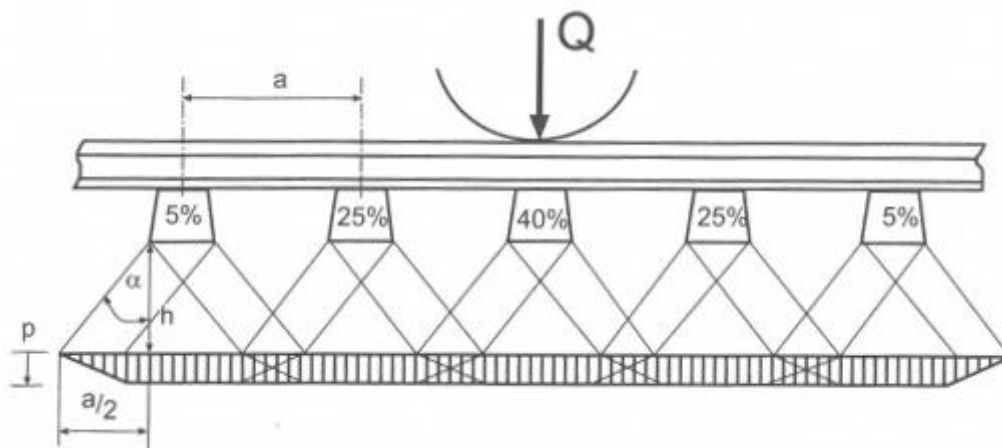
5.4.4 Ballastdjupet

Vid en tågpassage belastas rälen av ett stort tryck på en liten yta. Trycket förs sedan vidare ned i slipern och överförs till ballastbädden. Ballastens uppgift är att sprida ut trycket på en större yta, varvid trycket på banundergrunden minskas. Omfattningen av kraftspridningen beror på tryckspridningsvinkeln α . Nylagd ballast har beräknats med en tryckspridningsvinkel på 42°, medan beräkningar på förorenad ballast har resulterat i en tryckspridningsvinkel på endast 30°.

Det optimala ballastdjupet är då ballasten överför ett konstant tryck till banundergrunden. Den följande formeln räknar ut det optimala ballastdjupet h .

$$h = \frac{a}{2 * \tan(\alpha)} \quad (21)$$

Där a är sliperavståndet och α är tryckspridningsvinkeln.



Figur 37. Schematisk bild över det optimala ballastdjupet för att banundergrunden ska utsättas för ett jämnt tryck. [2]

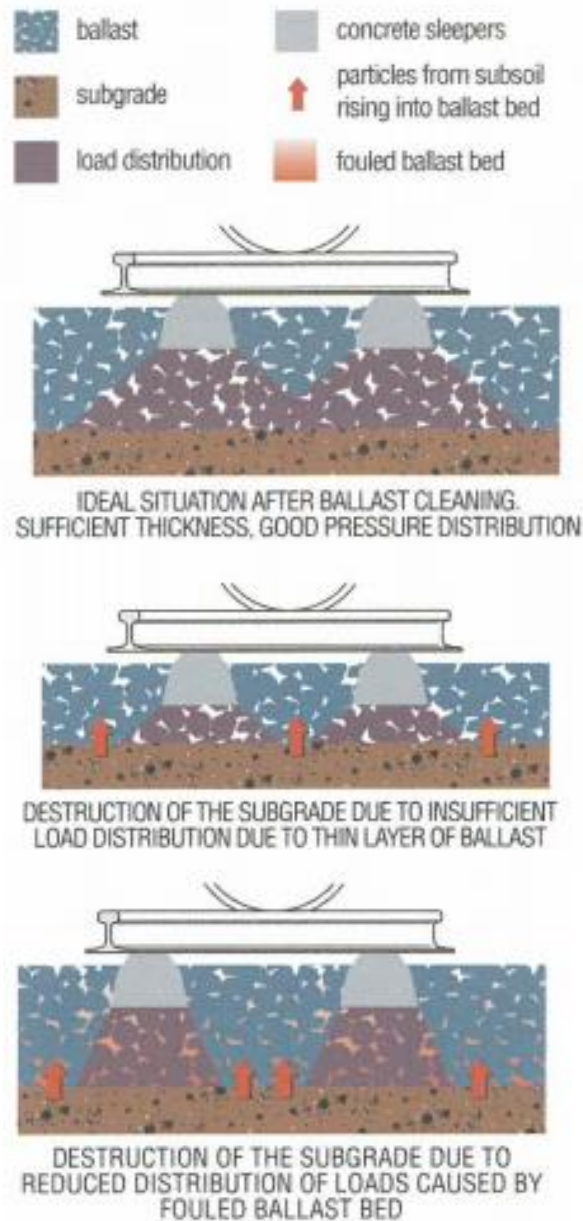
På Malmbanan är sliperavståndet $a = 0,6 \text{ m}$. Ballasten är på sina ställen kraftigt förorenad, enligt [18]. Därför antas tryckspridningsvinkeln att vara $\alpha = 30^\circ$, vilket kan ses som det värsta möjliga fallet. Närmare bestämt en sträcka där bankroppen utsatts för stora rörelser och finmaterial har

därmed pumpats upp i ballasten. Dessutom har pellets och slig spillts från vagnarna och beblandats med ballasten. Insättning i Ekvation (21) ger ballastdjupet.

$$h = \frac{0,6 \text{ m}}{2 * \tan 30^\circ} \approx 0,52 \text{ m} = 52 \text{ cm} \quad (22)$$

Med sliper mattor kommer det optimala ballastdjupet att vara mindre än i Ekvation (22). Detta eftersom sliper mattan bidrar till kraftutspredningen, vilket gör att ett jämnt tryck mot banundergrunden kan erhållas med ett lägre ballastdjup, se avsnitt 5.4.2.

Enligt Ekvation (22) ska det minimala ballastdjupet på Malmbanan vara 52 cm för att banundergrunden ska belastas med ett jämnt tryck. En ökad metervikt kommer att belasta banundergrunden med ett högre tryck. Det är då av betydelse att trycket är jämnt på banundergrunden, för att minska skredrisken i instabila jordlager.



Figur 38. Lastfördelningen vid idealt ballastdjup, för litet ballastdjup och ballast med hög föroreningsgrad. [2]

Den övre bilden i Figur 38 visualiserar idealfallet då ballastdjupet är tillräckligt det vill säga ballasten överför en jämn lastfördelning mot banundergrunden. Den mellersta bilden visar då ballastdjupet är för litet och en ojämn lastfördelning mot undergrunden. Slutligen visar den nedersta bilden en ballast med hög föroreningsgrad, vilket ger att dess tryckspridningsvinkel inte är tillräckligt stor. Även detta leder till en ojämn lastfördelning mot banundergrunden. En ojämn lastfördelning resulterar ofta i

finpartiklar kan tränga upp i ballasten från undergrunden, vilket påskyndar ballastföreningen ytterligare. [2]

5.4.5 Underballast

Underballasten är lagret mellan ballasten och banundergrunden. Dess huvudsakliga funktion är att sprida ut lasten till ett jämnt tryck och motverka att undergrunden blir överbelastad. Den ska även dränera bankroppen, motverka att finpartiklar från banundergrunden vandrar upp i ballasten och förhindra ballaststenar från att tryckas ned i undergrunden. [3]

På Malmbanan består underballasten av grusig sand och ska vara minst 2,2 m djupt för att förhindra tjäle i bankroppen. På flertalet sträckor på Malmbanan är detta dock inte fallet med tjälfrysning som följd. Detta kan motverkas med frostisolering, vilket redan har implementerats på vissa bansträckor. [16]

5.4.6 Frostisolering

Frostisoleringens uppgift är att förhindra tjälbildning i bankroppen. Tjäle bildas då vattnet i jorden och ballasten fryser, vilket leder till att bankroppen blir stum och därmed försämrad spårstyvhet. Det finns även en risk för tjälskador, då vattnet expanderar vid frysning, se avsnitt 5.5.1.1. [3]

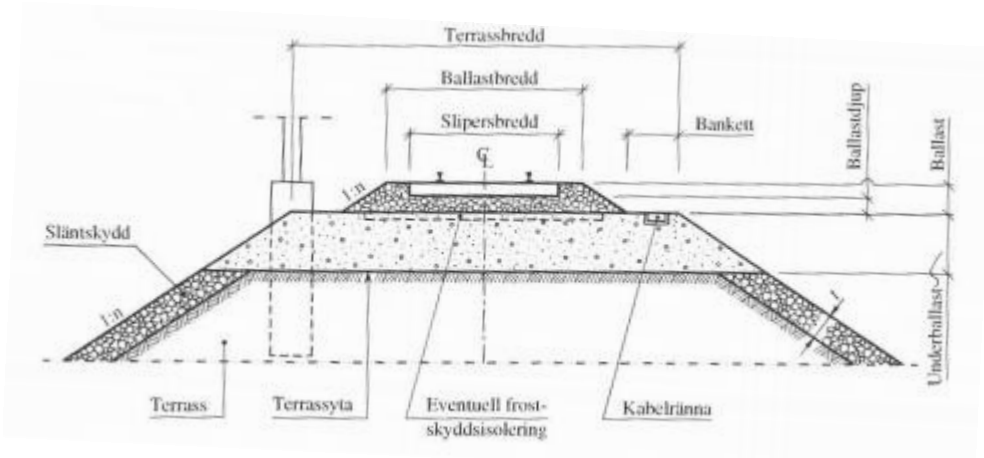
Frostisolering består oftast av ett lager cellplast mellan underballasten och terrassen. Isoleringen som ligger på Malmbanan idag är godkänd för en statisk tryckhållfasthet av 450 kPa och en dynamisk tryckhållfasthet av 200 kPa. Den statiska tryckhållfastheten kommer inte ändras till någon större grad vid en ökning av axellasten, dock kommer den dynamiska tryckhållfastheten överskridas redan vid en ökning till STAX 32,5. Det krävs inget byte av frostisoleringen vid testkörningen på STAX 32,5. Däremot kommer ett utbyte av frostisoleringen vara nödvändig på stora delar av banan, vid en permanent axellastökning till STAX 32,5. [16]

5.5 BANUNDERBYGGNAD

Banunderbyggnaden innefattar bankomponenterna under ballasten. Den ska ha hög bärighet och ha dränerande egenskaper. Detta är av betydelse för att förebygga skred och sättningar.

5.5.1 Geoteknik

Terrassen är det översta lagret av banundergrunden. För att minimera risken för skred och sättningar i bankroppen krävs en god kännedom av uppbyggnaden av undergrunden. Terrassen bör ha god stabilitet, god bärighet mot belastning, god avrinning och bra motstånd mot deformationer.



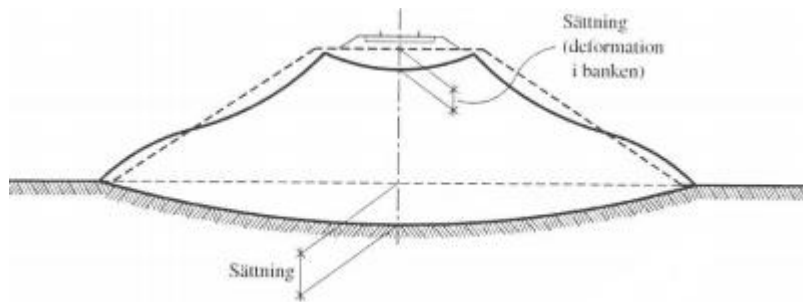
Figur 39. Skiss av en järnvägsbank. [3]

Terrassen består av den naturliga jorden som stödjer upp banöverbyggnaden. Vid behov kan även geotextil användas som materialskiljande förstärkning. Terrassen är oftast bomberad för att undvika vattensamlingar på terrassytan. Underbyggnadens egenskaper beror på faktorer som vilken jordartstyp underbyggnaden består av, fördelningen av kornstorlekar samt styvhet och styrka av sammansättningen. Banundergrunden består oftast av en sammansättning av grovkorniga jordarter, sand och grus, finkornig lera och silt eller organiska jordarter såsom torv. Fördelningen av kornstorleken i sammansättningen ger olika egenskaper. Sammansättningar med framförallt grovkorniga jordarter utan så mycket lera och silt (<5%) är överlag de bäst anpassade för underbyggnaden, ifall det finns bra dränering och jorden är väl kompakterad. Med större andel finkornigt material blir undergrunden instabilare med relativt lägre bärighet, för finkorniga jordar är det dock större betydelse vilken jordart det är ur bärighetssynpunkt. De flesta problemen uppstår dock i organiska jordar. För att veta hur väl undergrunden håller måste substantiella beräkningar genomföras där flertalet parametrar i undergrunden behöver vara kända. Allmänt kan sägas att undergrundens kapacitet mäts i trycket som tåls utan att stora deformationer uppstår. [3] [35]

5.5.1.1 Geotekniska problem

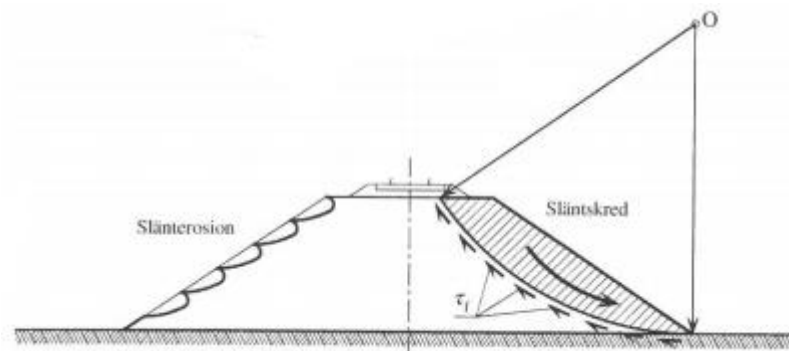
Det finns en rad olika geotekniska problem och en del av dessa listas nedan. [35]

- Sättningar - Belastningsökningar medför sättningar i bankroppen, då deformationer i jorden gör att banken sjunker ner.



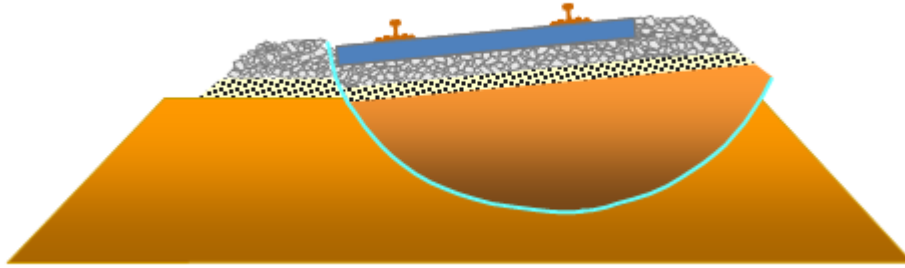
Figur 40. Skiss av en sättning. [3]

- Släntskred - För att motverka släntskred krävs god bankstabilitet.



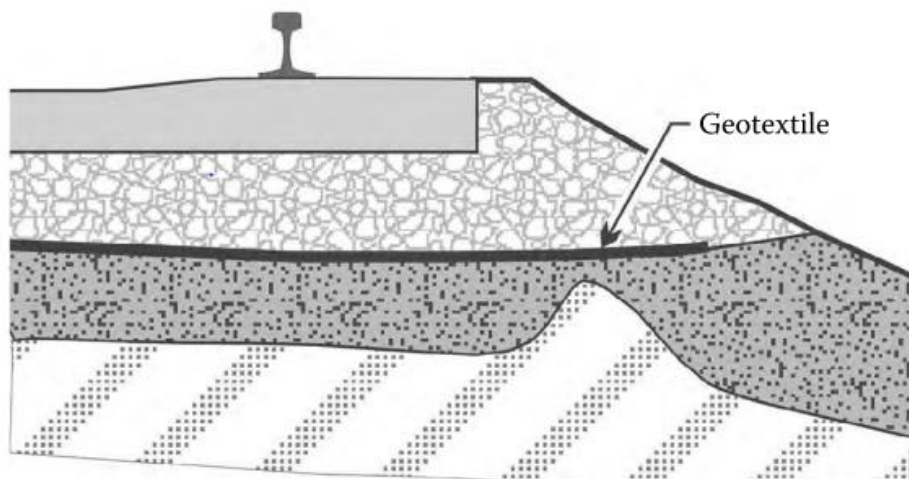
Figur 41. Ett släntskred. [3]

- Jordförvätskning - Uppstår då vattenportrycket blir för högt och kan leda till sättningar, vilket i sin tur kan medföra spårlägesförändringar.
- Skjuvbrott - Orsakas av att undergrunden inte klarar belastningen från tåget och banöverbyggnaden. Detta leder till att en glidyta bildas och delar av undergrunden "glider av" järnvägsbanken, se Figur 42. Skjuvhållfastheten i undergrunden är den avgörande faktorn ifall detta sker. Det är framförallt förekommande på nylagd bana och vid kraftiga regn och snösmältning, då skjuvhållfastheten blir lägre.



Figur 42. Skjuvbrott då banken glider i skjuvytan. [49]

Liknande problem kan också uppstå av upprepad belastning med hög påfrestning på undergrunden. Detta leder till att underbyggnaden stegvis trycks ut åt sidorna och sedan uppåt utanför sliprarna, se Figur 43. Detta leder till att vattenfickor bildas som mjukar upp undergrunden.



Figur 43. Ett skjuvbrott då vattenficka uppstår. [35]

- Volymförändringar - Vissa jordar volymförändras beroende på om de är torra eller vattendränkta. Detta ökar risken för sättning eller lyftning av bankroppen.
- Nednötning av banvallen - Orsakas framförallt av vattenflöden, men även vinden kan slita på vallen. Detta utgör inget direkt hot, men ifall detta sker under en längre tidsperiod utan åtgärd kan banstabiliteten försämrans.

5.5.1.2 Förstärkningar

För att öka bärigheten och stabiliteten för banunderbyggnaden förstärks banan på olika sätt. De vanligaste förstärkningsåtgärderna förklaras nedan.

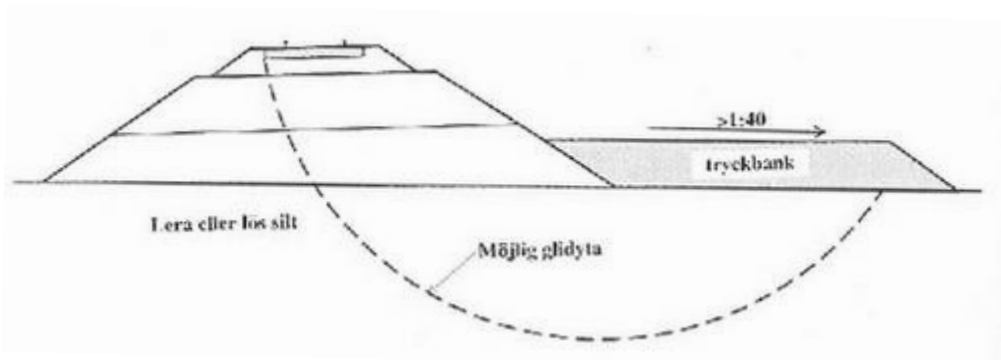
Vid nybyggnation av järnvägsbankar bör lösare jordar förbelastas så att jorden sätter sig innan banken byggs. Därefter kan banken stegvis fyllas på allteftersom jorden sätter sig. Detta gör att jorden blir belastad innan banan används och på så sätt motverkas framtida sättningar som för med sig risk för trafikstörningar.

En annan förstärkningsmetod är stabilisering med cementpelare där man nedsätter pelare av kalk och cement för att stabilisera upp byggnationen. Det är enkelt att anpassa pelarna efter varje specifikt problem genom att variera pelarkonfiguration såsom avstånd mellan pelarna, längd och diameter. Pelarna kan ha en diameter på 0,5-0,8 meter och vara upp till 25 meter långa. Pelarna medför ökad jordhållfasthet, vilket ökar stabiliteten och minskar risken för sättningar och skred.

Pelare kan även användas för volymsutfyllnad så att jorden komprimeras runt omkring och hållfastheten ökar, detta kan även ske med andra material såsom träpålar.

Bankpålning kan användas på bankar med låg stabilitet, där pålar med pålplattor implementeras för stabilitetsökning. Med bankpålning överförs lasten från banken och trafiken från de partierna med sämre stabilitet till fastare jord djupare ner i marken. Ifall bankpålning inte är tillräckligt utan att även undergrunden har undermålig bärighet kan ett påldäck läggas. Detta innebär att en betongplatta tar upp bank- och trafiklasten. Kraften överförs sedan via pålar till bärkraftigare jord. Detta kan ses som en pålad bro under banken och är en av de dyraste förstärkningsmetoderna.

För att öka stabiliteten används också tryckbankar, vilket är den mest använda förstärkningen på redan befintliga banor. Tryckbankar är både billigt och effektivt. Dock krävs extra markyta invid spåret, se Figur 44. [3]



Figur 44. En tryckbank. [3]

5.5.1.3 Problem på Malmbanan

Vidsträckta partier av banan är förlagd över lös torvjord. Dessa partier påverkas i större utsträckning vid en ökad belastning. Sättningshastigheten kommer öka då banan belastas med laster högre än vad den konsoliderats för. Speciellt kommer belastningsökningen märkas i övergångar vid fastare punkter

som vid vägövergångar och övergångar mellan lös torvjord och fastare friktionsjord, morän eller berg. [16]

Stabilitetsberäkningar bör utföras för att säkerställa att banstabiliteten är tillfredställande. Trafiklasten som bör användas vid stabilitetsberäkningar är enligt TK GEO 11 [39] tåglast 1, som används som standardlast vid stabilitetsberäkningar, som för malmtåg är 64 kN/m² vid STAX 30 och STVM 12. Då axellasten ökas kommer trafiklasten ökas enligt Tabell 20.

Tabell 20. Trafiklasten enligt TK GEO 11 [39] för tåglast 1 som används vid stabilitetsberäkningar.

Axellast	Metervikt	Trafiklast
STAX 30	STVM 12	64 kN/m ²
STAX 32,5	STVM 13	69,3 kN/m ²
STAX 35	STVM 14	74,7 kN/m ²
STAX 37,5	STVM 15	80 kN/m ²
STAX 40	STVM 16	85,3 kN/m ²

Det är främst sträckan Boden-Luleå som har stabilitetsproblem där undergrunden består utav sjö- och havssediment. Resterande delar av banan går på relativt fastare marker. [15]

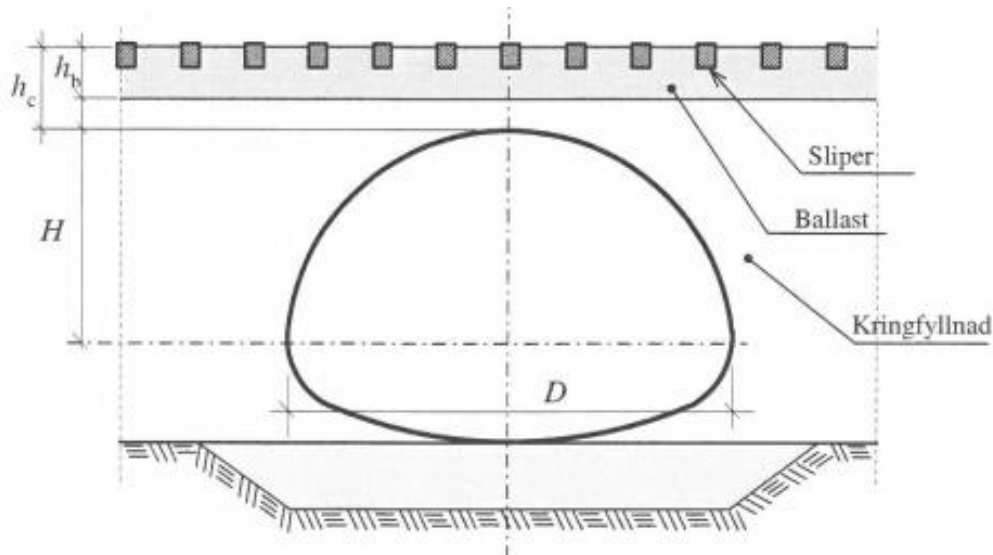
Säkerhetsgränserna för en viss sektion ges av $F_C \geq 1,50$ eller $F_{KOMB} \geq 1,35$. En mängd stabilitetsberäkningar genomfördes inför pilotprojektet för en axellastökning till STAX 32,5. Dessa går att finna i *Bilaga 8 - Stabilitetsberäkningar utförda för pilotprojektet för STAX 32,5 och genomförda stabilitetsåtgärder sedan 30 ton på Malmbanan* i avsnitt 9.8. Bifogat finns även genomförda åtgärder sedan projektet 30 ton på Malmbanan.

5.5.2 Trummor

Järnvägstrummorna på Malmbanan kommer att utsättas för en ökad belastning vid en ökning av metervikten. Detta gäller främst för trummor som är belägna högt upp i bankroppen. Påverkan av metervikten är liten på trummor vars hjässa ligger mer än 2 m från RUK. [16]

5.5.2.1 Trycket mot hjässan

En schematisk bild över tvärsnittet på en järnvägstrumma avbildas i Figur 45.



Figur 45. Tvärsnitt genom järnvägstrumma. [40]

Trycket (Vertikalspänningen) σ_v mot hjässan av trumman ökar linjärt med metervikten och beskrivs av Ekvation (23). [40]

$$\sigma_v = \frac{2p}{\pi h_c} \quad (23)$$

Där p är metervikten och h_c är djupet mellan hjässan och RUK, även känt som *Överfyllnadsdjupet*.

Beräkningar görs på en trumma med överfyllnadsdjup är 2 m, enligt Ekvation (23). Resultatet för olika axellaster och metervikter presenteras i Tabell 21.

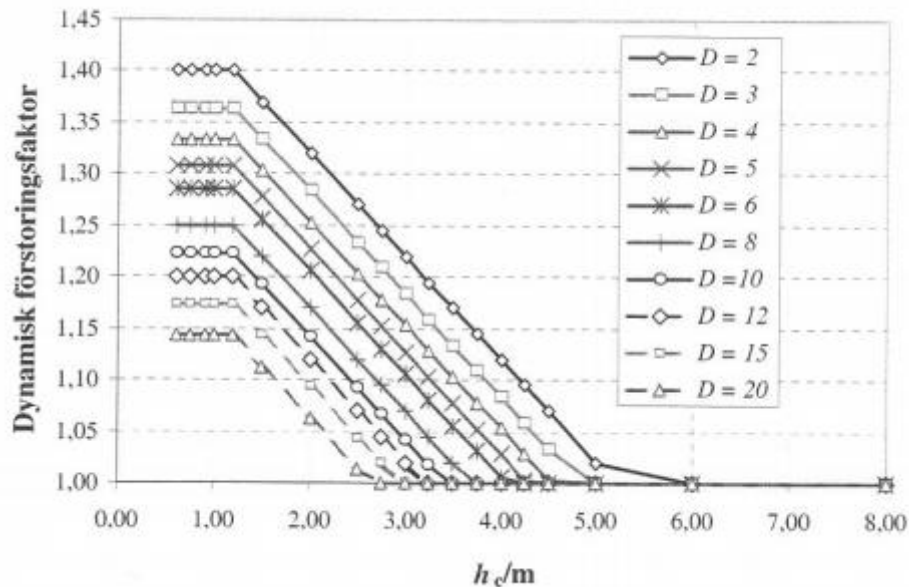
Tabell 21. Metervikten med avseende på vertikalktrycket mot hjässan på trumman.

Axellast	Metervikt	Tryck mot hjässan av en trumma 2 m från RUK
STAX 30	STVM 12	3,82 kPa
STAX 32,5	STVM 13	4,14 kPa
STAX 35	STVM 14	4,47 kPa
STAX 37,5	STVM 15	4,77 kPa
STAX 40	STVM 16	5,09 kPa

Enligt Tabell 21 och Ekvation (23) ökar trycket mot hjässan med ökad metervikt. Detta betyder att en stor andel trummor antagligen behöver förstärkas alternativt bytas ut för att klara axellaster uppemot STAX 40 (STVM 16). Även trummor belägna mer än 2m under RUK kommer att påverkas av högre axellaster, med rasrisk som följd. Till exempel är vertikalktrycket på hjässan med överfyllnadsdjup på 2m vid STAX 40 (STVM 16) detsamma som vertikalktrycket på hjässan med överfyllnadsdjup 1,5m vid STAX 30 (STVM 12), enligt Ekvation (24).

$$h_c = \frac{2 * 12}{\pi * 5,09} = 1,5 \text{ m} \quad (24)$$

I ovanstående beräkningar har inte det dynamiska tillskottet beaktats. Enligt *Dimensionering av Rörbroar* [40] ges den dynamiska förstöringsfaktorn av Figur 46.



Figur 46. Den dynamiska förstöringsfaktorn med avseende på överfyllnadsdjup för olika diametrar på trumman. [40]

Figur 46 skildrar hur den dynamiska förstöringsfaktorn sjunker med ökat överfyllnadsdjup, tills det tillslut når detsamma som om endast den statiska lasten beaktas. Förstöringsfaktorn beror även på diametern på trumman, då en mindre diameter kommer ha en högre dynamisk förstöringsfaktor för små överfyllnadsdjup.

5.5.2.2 Underhållsåtgärder

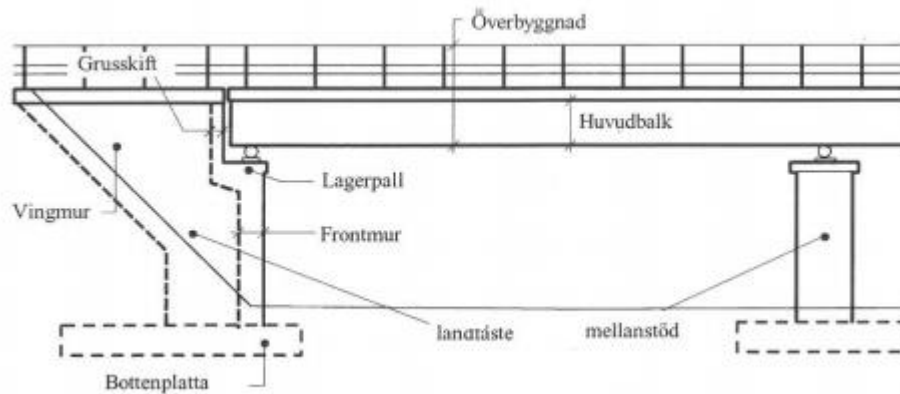
Trummor med mindre skador kan repareras genom tätning. En större åtgärd som kan genomföras är lining, vilket är då glasfiberarmerat plaströr förs in i den befintliga trumman. [41] Vid testkörningen med STAX 32,5 kommer en utökad besiktning ske av trummorna och för trummor med litet avstånd till RUK kommer rörelsemätningar att genomföras. [16]

5.5.3 Broar

Järnvägsbroar belastas ofta med större laster än vad exempelvis vägbroar gör. Belastningen är ej heller lika utspridd i sidled, samt det dynamiska tillskottet är större. För goda gångegenskaper krävs även större styvhet i brokonstruktionen. [22]

Broöverbyggnaden tar upp krafterna från tågtrafiken. De brokomponenter som ingår är farbanan, huvudbalkar som tar upp belastningskrafterna i brons längdriktning, brobaneplattan, tvärbalkar etc.

De brokomponenter som används för att föra ned belastningskraften från broöverbyggnaden till den bärkraftiga jorden eller berget benämns bronderbyggnaden. Underbyggnaden består oftast av landfästen och mellanstöd. [42]

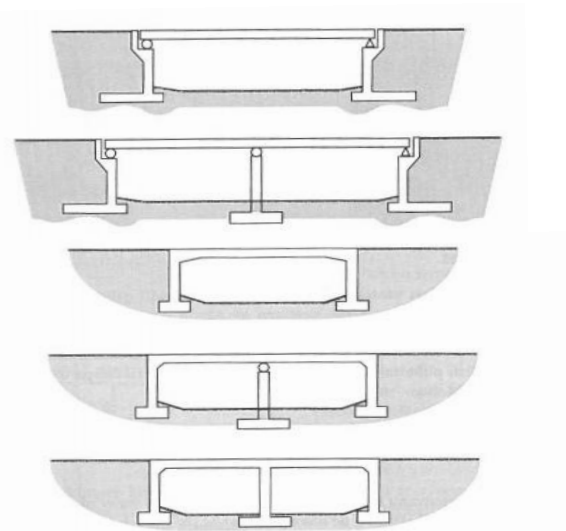


Figur 47. Olika brokomponenter på en balkbro. [42]

5.5.3.1 Plattbro

Plattbron är den dominerande brotypen i Sverige och även längs Malmbanan, se Tabell 22. Det finns ett antal olika typer av plattbroar, enligt Figur 48. De två översta bilderna visar en enkel platta med fristående landfästen. De tre nedersta bilderna visar plattramar, med ett eller flera fack. [42]

En enkel platta med fristående landfästen används på broar med kort spännvidd, på ungefär 8 till 10 meter. Plattram med ett eller flera fack kan däremot användas på spännvidder upp till 20 meter. Vid spännarmering kan den maximala spännvidden utökas enda upp till 35 meter.



Figur 48. Olika typer av plattbroar. [42]

Plattramen har ett antal fördelar jämfört med en fritt upplagd platta. Däribland att horisontal och momentkrafter fördelas till brostöden i en större grad, vilket minskar belastningen på brobanepattan. Dessutom krävs inga lager och övergångskonstruktioner mellan brobanepatta och brostöd. Detta har visat sig minska underhållskostnaderna. [42]

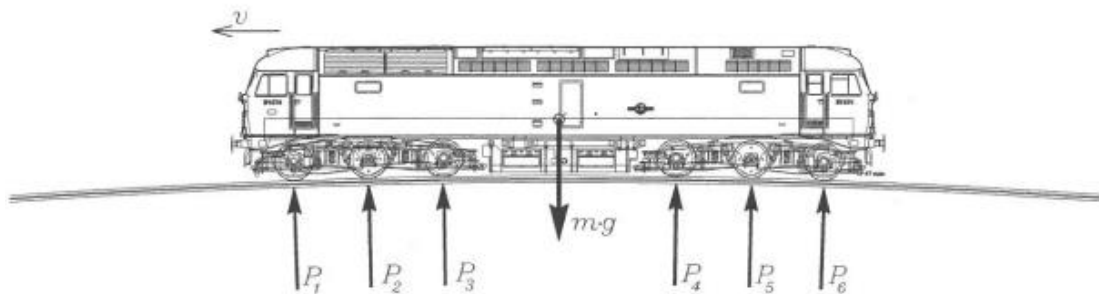
5.5.3.2 Balkbro

Balkbroar kan användas inom ett spännviddsintervall mellan 5-200 meter. Betong- och stål balkbro är ofta ett bra alternativ till plattbron vid långa spännvidder, då plattbron ofta blir väldigt tung och dyr. [42]

Det finns två olika varianter av balkbron, varav den första är fritt upplagda balkar med fristående landfästen. Den andra varianten är en balkram i ett eller flera fack.

5.5.3.3 Dynamiska effekter

Den dynamiska lastfaktorn beror på den dynamiska interaktionen mellan fordonen och brokonstruktionen. För att kunna avgöra den dynamiska lastfaktorns storlek krävs kunskap om fordonets fart och fjädringsegenskaper samt om brons elastiska och dämpande egenskaper. [22]



Figur 49 Krafter på fordonet vid en bropassage. [22]

Skillnaden mellan de krafter verkande på bron och fordonets tyngd är inverkan från tröghetskrafterna. Detta ger Ekvation (25).

$$\sum P_i(t) \neq mg \quad (25)$$

Tröghetskrafterna är brons och fordonets vertikala acceleration och beror både på fjädringsegenskaperna hos fordonet och bron samt spårjämnheter. Detta ger att den effektiva kraften ges av Ekvation (26). [22]

$$\left(\sum P_i \right)_{dim} = \gamma * mg \quad (26)$$

Där γ är den dynamiska lastfaktorn, som normalt varierar mellan $0 \leq \gamma \leq 2$. Det ska även poängteras att den dynamiska lastfaktorn är mycket osäker och kan ha stora variationer mellan olika broar. För att ta fram den dynamiska lastfaktorn för en bro som ska byggas bör mätningar göras på redan byggda broar med likartade dynamiska egenskaper. [22]

5.5.3.4 Bärighetsutredning

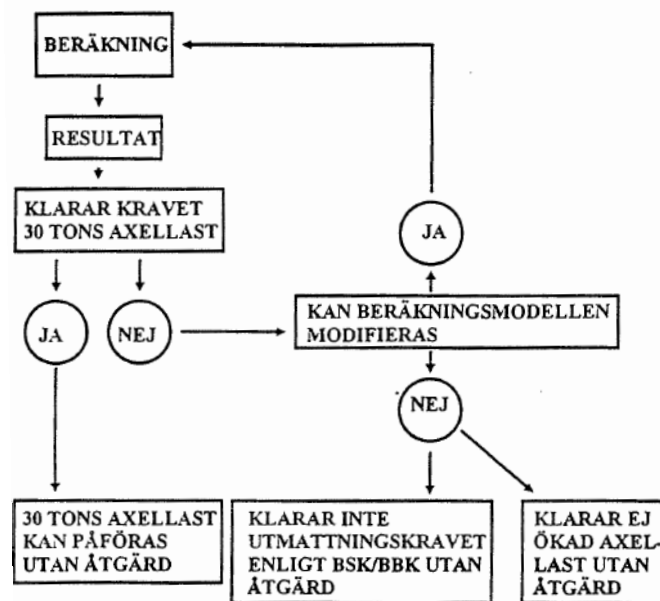
Vid en axellastökning måste samtliga broar bärighetsberäknas och okulärbesiktigas. Tillvägagångssättet vid utredningen som föranledde STAX 30 på Malmbanan var att samtliga broar kontrollberäknades för att sedan välja ut de broar som hade sämst förutsättningar att klara den

ökade axellasten. De broarna med störst skillnad mellan dimensionerad last och effektiv last valdes ut för ytterligare detaljstudie. [17]

På de utvalda broarna beräknades utnyttjandegrad U , enligt Ekvation (27).

$$U = \frac{E}{R} \quad (27)$$

Där E är brons lasteffekt och R är brons bärförmåga. Om utnyttjandegraden är större än 1 ($U > 1$) har beräkningsmodellen modifierats och räknats om. I vissa fall krävdes en tredje omräkning med ytterligare modifieringar innan bron slutligen kunde godkännas för en axellastökning. [17]



Figur 50. Beräkningsschema för den omfattande utredningen som föranledde STAX 30. [17]

De beräkningar som gjordes visade att utmattningskapaciteten på många broar ej var tillräcklig för STAX 30. Detta betyder att livslängden förkortas och ett brobyte måste utföras tidigare. Även deformationer i lagerrullar och lagerplattor är något som skedde vid en ökning av axellasten. [17]

Innan en axellastökning till STAX 32,5 tillåts måste en kontrollmätning av ballastdjupet utföras, samt en inspektion med syftet att finna bärighetspåverkande skador. Detta gäller för samtliga broar som berörs av axellastökningen. Överbyggnadens bärighet inspekteras för de broar som är dimensionerade för STAX 25. För broarna dimensionerade för STAX 30 bestäms bärigheten med hjälp av en lasteffektjämförelse, se Ekvation (27). Slutligen studeras underbyggnadens bärighet för samtliga broar. [19]

5.5.3.5 Bärighet för broarna på Malmbanan

Tabell 22 visar bärigheten för samtliga broar längs det södra omloppet av Malmbanan. Uppgifterna är hämtade från BaTMan. [43]

Tabell 22. Samtliga broar längs Malmbanans södra omlopp och dimensionerande trafiklast. [43]

Bronamn	Bandel	Km+m	Konstruktionstyp	Material	Dimensionerande trafiklast [kN]
Uddebo, kulvert	122	1184+091	Plattram 0-leds	Betong armerad	616
Uddebo VP	122	1184+058	Balkbro kontinuerlig	Betong armerad	325
Luleå ledningskulvert	122	1181+782	Plattram 0-leds	Betong armerad	947
Svartholmssundet	122	1180+435	Plattbro fritt upplagd	Betong armerad	325
Bensbyvägen	119	1178+940	Balkbro kontinuerlig	Betong armerad	325
Kalkkällvägen	119	1177+969	Balkbro kontinuerlig	Betong armerad	325
Haparandavägen	119	1177+297	Balkbro kontinuerlig	Betong armerad	333
Notviken II	119	1176+500	Plattram 0-leds	Betong armerad	326
Notviken I	119	1175+971	Plattram 0-leds	Betong armerad	325
Notviken, E4	119	1172+905	Balkbro kontinuerlig	Betong spännarmerad	325
Gammelstad	119	1170+167	Balkbro kontinuerlig	Betong armerad	325
Gårdsavabäcken	119	1168+240	Plattbro	Betong armerad	344
Sunderbybäcken	119	1167+85	Balkram 0-leds	Betong armerad	325
Träskbäcken	119	1166+30	Plattbro fritt upplagd	Betong armerad	326
Svartbyn GC-port	119	1148+154	Plattram 0-leds	Betong armerad	332
Svartbyträsket, malmspåret	120	1144+924	Plattbro fritt upplagd	Betong armerad	325
Manhemsgatan VP, malmspåret	120	1144+662	Balkbro kontinuerlig	Betong spännarmerad	330
Avabäcken	120	1146+00	Plattbro fritt upplagd	Betong armerad	350
Svartbäcken	118	1151+400	Plattbro fritt upplagd	Betong armerad	325
Holmbäcken	118	1152+165	Plattbro fritt upplagd	Betong armerad	325
Edbäcken	118	1153+576	Plattbro fritt upplagd	Betong armerad	325
Gyttjeån	118	1163+850	Plattbro fritt upplagd	Betong armerad	327
Risbergsbäcken	118	1169+600	Plattbro fritt upplagd	Betong armerad	370
Sandträskbäcken	118	1180+605	Plattbro fritt upplagd	Betong armerad	474
Svartmyrbäcken	118	1198+843	Plattbro fritt upplagd	Betong armerad	347
Rickertsbäcken	118	1201+706	Plattbro fritt upplagd	Betong armerad	344
Krokträskbäcken	118	1205+620	Plattbro fritt upplagd	Betong armerad	325
Tjäruträskbäcken	118	1214+750	Plattbro	Betong armerad	325
Tobilsbäcken	118	1224+520	Plattbro fritt upplagd	Betong armerad	344
Lommebäcken	118	1228+060	Plattbro fritt upplagd	Betong armerad	325
Kvarnbäcken 1	118	1230+480	Plattbro fritt upplagd	Betong armerad	325
Kvarnbäcken 2	118	1231+786	Plattbro fritt upplagd	Betong armerad	325
Harrbäcken	118	1235+151	Plattbro fritt upplagd	Betong armerad	325
Aimojokk	118	1238+850	Plattbro fritt upplagd	Betong spännarmerad	325
Påunakbäcken	118	1242+080	Plattbro fritt upplagd	Betong armerad	346
Kaipajokk	118	1245+145	Plattbro fritt upplagd	Betong armerad	455
Luobmetjokk	118	1248+794	Plattbro fritt upplagd	Betong armerad	325
Kuivobäcken	118	1253+364	Plattbro fritt upplagd	Betong armerad	325
Lautajoki	118	1256+703	Plattbro fritt upplagd	Betong armerad	341
Råne älv	118	1265+485	Plattbro fritt upplagd	Betong armerad	325

Kaartibäcken	118	1279+018	Plattbro fritt upplagd	Betong armerad	325
Venetjoki 1	118	1282+283	Plattbro fritt upplagd	Betong armerad	433
Pirtijoki	118	1285+596	Plattbro fritt upplagd	Betong armerad	341
Venetjoki 2	118	1285+940	Balkbro fritt upplagd	Betong armerad	325
Båthusbäcken	118	1293+100	Plattbro fritt upplagd	Betong armerad	332
Leipirjoki 1	118	1299+130	Plattbro fritt upplagd	Betong armerad	325
Leipirjoki 2	118	1303+920	Plattbro fritt upplagd	Betong armerad	325
Spännajokk	118	1307+430	Plattbro fritt upplagd	Betong armerad	325
Vassara älv	114	1312+019	Balkbro fritt upplagd	Stål	325
Voskibäcken	114	1315+118	Plattbro fritt upplagd	Betong armerad	326
Malmbergsvägen	114	1315+323	Plattbro	Betong armerad	325
Källbäcken	114	1316+235	Balkbro fritt upplagd	Betong armerad	333
Bergbäcken	114	1317+175	Balkbro fritt upplagd	Betong armerad	334

Enligt Tabell 22 klarar samtliga broar STAX 32,5, men för högre axellaster krävs förstärkningar på större andelen av broarna. Endast 7 av de 53 broarna har en dimensionerande trafiklast på över 350, vilket krävs för STAX 35.

5.5.3.6 Förstärkningsåtgärder av brobaneplattan

Ett antal broar längs Malmbanan kommer behöva förstärkas för att klara av en högre belastning från tyngre axellaster. Brobaneplattan kan förstärkas genom pågjutning av armerad betong. Metoden går ut på att armerad betong placeras i formar och gjuts fast på den ursprungliga betongens yta. Pågjutningen kan ske såväl vertikalt som horisontellt och både på brobaneplattans ovansida som dess undersida. Den pågjutna betongen samt armeringen blir på så sätt en del av brobaneplattan, vilket resulterar i ett ökat brobanetvärsnitt. Detta kommer att öka brobaneplattans bärighet, då den pågjutna armeringsbetongen kan uppta belastningen från banöverbyggnaden på samma sätt som den befintliga betongen. [44]

Broplattans bärighet kan även förstärkas med kolfiberkomposit som limmas fast mot betongen. Denna sorts förstärkning kan även användas på bropelare. Kolfiberkomposit har goda utmattningsegenskaper och därmed lång livslängd. Nackdelen är att den allmänt är dyrare än andra förstärkningsmaterial. [44]

5.5.3.7 Sprickreparation

Syftet med en sprickreparation är att öka bärförmågan, förbättra funktionsegenskaperna och att öka komponentens styvhet. Det finns två olika tillvägagångssätt *försegling* och *injektering*.

- Försegling innebär tätning av sprickorna med membran, fogmassa eller spackling.
- Injektering sker med antingen cementbaserade eller kemiska injekteringsmedel.

Vilket tillvägagångssätt som väljs beror på vilken hållfasthet som krävs samt vilken spricktyp som ska reparas. Spricktyper kan ha varierande bredd och vara levande (sprickökning) eller döda (konstant sprickbredd över tid). Försegling används oftast för att döda sprickor. [45]

Cementbaserade injekteringsmedel är billiga, ofarliga för miljön och egenskaper som liknar betongens. Nackdelen är att de vanligtvis inte kan användas på levande sprickor.

Kemiska injekteringsmedel går däremot att använda på levande sprickor. Olika typer används bland annat *epoxi*, *polyuretan* och *polyester*. Nackdelen är att substansen har andra egenskaper än betongen. Dessutom är medlet relativt dyrt och ofta miljöfarligt. [45]

6 NÖDVÄNDIGA ÅTGÄRDER

6.1 RÄLEN

För att klara av axellaster uppemot STAX 40 krävs utbyte av stora delar av rälen. Det rekommenderas att R350LHT fortsätter att användas vid nyläggning av spår. Det bedöms att R350LHT är duglig för en axellast på STAX 40, både på rakspår och som ytterräl i kurvor. På rakspår kan även R320Cr läggas och då klara en axellast upp till STAX 37,5, se Tabell 23 nedan. Standardrälen R260 kommer däremot att inte vara duglig ens för STAX 32,5 utan att plastisk deformation sker i hjul räl kontaktytan samt att det finns risk för att shellings uppstår. Därför görs bedömningen att allt rälstål av typen R260 bör bytas ut i huvudspåret omgående.

Vid gång på rakspår, med ett dynamiskt tillskott på 30 % av statiska lasten, fås Tabell 23.

Tabell 23. Rälstål som används på Malmbanan och bedömd STAX för respektive rälstål vid gång på rakspår.

	R260 (880 MPa)	R320Cr (1080 MPa)	R350LHT (1175 MPa)	Kommentar
STAX 32,5	X	✓	✓	Standardrälen R260 klarar ej utan plastisk def. i hjul räl kontakten och risk för shellings.
STAX 35	X	✓	✓	
STAX 37,5	X	✓	✓	
STAX 40	X	X	✓	Skjuvspänningen i rälshuvudet är något för stort för att inte shellings ska uppstå i R320Cr

Vid kurvtagning, med en kvasistatisk last på 20 % av den statiska lasten, fås Tabell 24.

Tabell 24. Rälstål som används på Malmbanan och bedömd STAX för respektive rälstål som ytterräl vid kurvtagning.

	R260 (880 MPa)	R320Cr (1080 MPa)	R350LHT (1175 MPa)	Kommentar
STAX 32,5	X	✓	✓	
STAX 35	X	X	✓	Skjuvspänningen i rälshuvudet blir för stort för att inte shellings ska uppstå för R320Cr.
STAX 37,5	X	X	✓	
STAX 40	X	X	✓	För skarpa kurvor läggs förslagsvis R370CrHT med ännu högre sträckgräns. Möjligtvis behövs även detta vid genomsnittliga kurvor då hjulradien förminskas vid ökat slitage.

Som ytterräl i kurvor bedöms R320Cr duglig upp till STAX 32,5. Vid en högre axellast är skjuvspänningen i räls huvudet så pass stor att risken finns att shellings uppstår. R350LHT bedöms däremot duglig som ytterräl i kurvor upp till STAX 40. Detta resonemang förutsätter att den kvasistatiska lasten är 20 % av den statiska lasten. För skarpare kurvor vid STAX 40 utsätts ytterrälen troligtvis för högre belastning, vilket ger bedömningen att R370CrHT är lämplig som ytterräl vid STAX 40 och skarpa kurvor.

Ett alternativ för att minska trycket i kontaktytan mellan hjul och räl, och på så sätt minska risken för plastisk deformation och shellings, är att öka malmvagnarnas hjulradie alternativt förstora rälsprofilen. Denna åtgärd skulle dock öka slitaget (nötning) eftersom kontaktytan mellan hjul och räl är större, vilket ger ökade krypkrafter.

6.2 RÄLSBEFÄSTNINGAR

För att säkerställa vilka åtgärder som behöver genomföras och kunna planera byten av befästningar bör en ordentlig komponentinventering utföras.

De starkaste befästningarna som används idag, starkare versionerna av e-clips(e-PLUS och e2000) och Fastclip (FC1600), har enligt Pandrol tillräcklig klämkraft och rälsvandringmotstånd för järnvägar med maximal axellast upp till 40 ton och minimal kurvradie av 150 m, vid användning av mellanlägg utav PH/HDPE. För STAX 37,5 – 40 kan starkare befästningar, till exempel Pandrol Fastclip FE RR, användas speciellt i snäva kurvor där anspänningen är som högst, de kommer också ha högre livslängd.

De andra befästningarna som används uppnår inte kraven från Trafikverket respektive SS-EN standarden, men anses vara erforderliga att använda på rakspår vid STAX 32,5 men bör succesivt bytas ut när tillfälle ges.

Mellanläggen bör bytas ut från gummi till polyuretan(PU) eller högdensitets polyeten(HDPE). Enligt Pandrol ska de befästningar med gummimellanlägg klara upp till max STAX 32,5.

Tabell 25. Rälsbefästningarna på Malmbanan och bedömd STAX för respektive typ av rälsbefästning.

	e-Clips(e1800)	e-Clips(e-PLUS/e2000)	Fastclip(FC1600)	Kommentar
STAX 32,5	X/✓	✓	✓	e1800 och dylika e-clips kan användas på rakspår men bör succesivt bytas ut.
STAX 35	X	✓	✓	Gummimellanläggen bör ha bytts ut mot PU/HDPE mellanlägg.
STAX 37,5	X	✓	✓	
STAX 40	X	✓	✓	e-Plus/e2000 och FC1600 klarar STAX 40 enligt Pandrol men starkare befästningar kan behövas.

6.3 SLIPRAR

Samtliga sliprar bedöms klara av en axellastökning till STAX 32,5. Detta gör att testkörningen och en permanent ökning till STAX 32,5 bedöms klaras av utan åtgärder. Dock kommer naturligtvis livslängden minska på sliprarna då de utsätts för en högre axellast.

Enligt antagandet som görs kommer inte sliprarna av typen S3 och S7 vara dugliga för STAX 35. Detta eftersom böjmomentet i slipermitt överstiger det maximalt tillåtna för båda slipermodellerna. För en axellastökning till STAX 35 bör samtliga sliprar av typen S3 och S7 bytas ut till A22 slipern, som bedöms klara STAX 40. (A22 slipern är endast dimensionerad för STAX 35) Alternativt byts det till en slipermodell som är ännu hållfastare än A22 slipern, förslagsvis en slipermodell dimensionerad för STAX 40.

Vid STAX 37,5 och STAX 40 görs bedömningen att även A9 slipern (inläggningsår 1989) kommer att behöva bytas ut. Detta eftersom livslängden förkortas vid ökad axellast. För att STAX 37,5 och STAX 40 ska möjliggöras på Malmbanan måste alltså samtliga slipermodeller längs Malmbanan bytas ut, förutom slipermodell A13 och A22.

Tabell 26. Slipermodellerna på Malmbanan och bedömd STAX för respektive slipermodell. Detta gäller för sliprar i huvudspår med STH 60 km/h för betongsliprar och STH 40 km/h för träsliprar.

	Träslipers	S3, S7	A9	A13, A22	Kommentar
STAX 32,5	✓	✓	✓	✓	Samtliga slipermodeller bedöms klara en axellastökning till STAX 32,5.
STAX 35	✓	X	✓	✓	Böjmomentet i slipermitt bedöms för högt för slipermodell S3 och S7.
STAX 37,5	X	X	X	✓	Slipermodell A9 behöver troligtvis stegvis bytas ut pga. förkortad livslängd. Spänningen i rälläget över maximalt tillåtet för träslipers av furu.
STAX 40	X	X	X	✓	Slipermodell A22 och A13 bedöms vara duglig för STAX 40.

6.4 BALLAST

En högre belastning kommer att påskynda nedkrossningen av ballast. En nedbruten ballast bildar lera, vilket orsakar ballastförorening. Ytterligare orsaker till ballastföroreningar är skvättsträckor, då finmaterial pumpas upp från underballasten, och att det spills pellets och slig från vagnarna.

För att möjliggöra en axellastökning till STAX 35 och högre krävs först och främst ballastrening. Dessutom krävs ett större ballastdjup, som på sina håll i dagsläget understiger 50 cm. [16] Bedömningen görs att ett ballastdjup på 52 centimeter är tillräckligt för att sprida ut ett jämnt tryck mot banundergrunden, se Ekvation (22). Detta minimerar därmed risken för jord- och bergskred

orsakade av en ojämn belastning. Det kommer även hämma att finmaterial rör sig upp från underballasten och bildar så kallade skvättsträckor.

En ballastrening bör utföras oavsett om en axellastökning verkställs eller inte. Dock bedöms det inte nödvändigt att en ballastrening sker vid STAX 32,5. [16] Vid högre axellaster bedöms dock en ballastrening nödvändig, samt att ballastdjupet ökas till 52 cm på de sträckor där så krävs.

6.5 BANUNDERBYGGNAD

6.5.1 Geoteknik

Att utföra stabilitetssimuleringar av en järnvägsbank vid belastning är komplext och beror på flertalet faktorer, vilket leder till en stor osäkerhet. Istället utförs oftast provkörningar med högre laster och mätningar sker på stabilitetsförändringar i banundergrunden, bland annat sättningshastigheten och bärigheten. Banundergrunden förstärks därefter på bansträckor där problem har uppstått. Dock bör åtgärder utföras i förbyggande syfte på bansträckor där problemrisken är hög. Detta är främst bansträckor med övergångar runt fastare undergrund till mjukare, som vid vägövergångar och övergångar mellan torvjord och fastare friktionsjordar, morän eller berg. [16] [46]

Kontrollmätningar bör ske kontinuerligt längs med banan, speciellt vid sektioner med tidigare problem. Detta för att säkerställa att problemen inte förvärras och allvarigare skador sker på järnvägsbanken.

6.5.2 Trummor

Störst påverkan kommer att ske på trummor som är belägna högt upp i bankroppen. Följden blir att sprickor uppkommer i trumtaket, som tar den högsta belastningen. I vissa fall sker till och med stenras från trumtaket då belastningen blir för hög. Skador har även skett i övergången mellan den gamla stentrumman och förlängningsröret, som implementerats vid breddning av banvallen.

Vid en axellastökning till STAX 32,5 krävdes ingen åtgärd alls på större andelen trummor. 12 stycken behövde tätas med plåt eller geotextil, medan 8 stycken behövde mer omfattande åtgärder såsom lining. Gemensamt för samtliga trummor i behov av underhåll var att de är belägna mindre än 2 meter under rälsunderkant. [16]

Vid ytterligare axellastökningar kommer trummor belägna högt upp i bankroppen att påverkas i ännu större utsträckning. Följden är troligtvis att fler trummor behöver mer omfattande åtgärder såsom lining. Ett annat alternativ är utbyte mot bantrumma, som tål en betydligt högre belastning mot trumtaket. Vid en ökad axellast kommer ett högt tryck att sprida sig längre ned i bankroppen, vilket troligtvis kommer att resultera i att underhåll blir nödvändigt på djupare belägna trummor. Då främst i form av tätning.

6.5.3 Broar

Längs med Malmbanans södra omlopp finns 53 broar. Varje bro är unik och en enskild bärighetsutredning har därmed skett på respektive bro. Samtliga broar längs det södra omloppet har bärighetsberäknats att klara STAX 32,5. Dock har bedömningen gjorts att endast 7 stycken broar har tillräckligt god bärighet för att godkännas för STAX 35. Två av dessa broar (*Risbergsbäcken* och *Avabäcken*) kommer ej klara STAX 37,5. Endast 5 stycken broar är dugliga för STAX 40, enligt Tabell 27.

Tabell 27. Bedömd STAX för broarna längs Malmbanan.

Kommentar		
STAX 32,5	✓	Samtliga broar är bärighetsberäknade att klara STAX 32,5
STAX 35	✗	Endast 7 av 53 broar är beräknade att klara en höjning till STAX 35. De 7 broarna är: Luleå ledningskulvert, Uddebo (kulvert), Sandträskbäcken, Kaipajokk, Venetioki 1, Risbergsbäcken och Avabäcken.
STAX 37,5	✗	Risbergsbäcken och Avabäcken har inte tillräckligt bra bärighet för att godkännas för STAX 37,5.
STAX 40	✗	Luleå ledningskulvert, Uddebo (kulvert), Sandträskbäcken, Kaipajokk och Venetioki 1 har samtliga bärighetsberäknats att klara STAX 40.

För en axellastökning till STAX 35 krävs således att 48 broar längs det södra omloppet åtgärdas för att få ökad bärighet. Vilka förstärkningsåtgärder som krävs varierar för respektive bro. För varje axellasthöjning bör en bärighetsutredning utföras för varje enskild bro och förstärkningsåtgärder vidtas därefter, se avsnitt 5.5.3.6.

7 SLUTSATSER OCH REKOMMENDATIONER

Arbetet har resulterat i ett antal slutsatser och rekommendationer. Dessa framgår av att läsa rapporten, och sammanfattas även i punktform nedan.

7.1 RÄLEN

- Rälstålet R350LHT fortsätter att användas vid nyläggning av spår, som klarar vad som kravställs för STAX 40 vid gång på rakspår och stora kurvradier (kvasistatisk last > 20%). Observera att minimalt tillåtna hjulradien på malmvagnarna bör omprövas för att R350LHT ska klara vad som kravställs vid kurvtagning av genomsnittliga kurvor vid STAX 40.
- Rälstålet R370CrHT bör implementeras i skarpa kurvor (kvasistatisk last > 20 %) för att möjliggöra för STAX 40.
- All standardräl R260 bör bytas ut omgående, vilket motsvarar 20 % av rälen i dagsläget. Detta eftersom rälstålets sträckgräns inte är tillräckligt hög för att förhindra att plastisk deformation sker i kontaktytan mellan hjul och räl vid ogynnsamma spårförhållanden.
- Rälprofilen 50E3 bör bytas ut omgående till 60E1. En mindre rälprofil kommer leda till en mindre kontaktyta mellan hjul och räl, vilket i sin tur ger ökat höjdslitage. När höjdslitaget blir betydande på 50E3 rälen minskar bärigheten och även utmattningkapaciteten. Bytet till 60E1 kräver spårbyte, dvs. byte av rälen, sliprar och ballast. Detta eftersom sliprarna är tillverkade endast för 50E3 rälen. [14]
- Samtliga isolerskarvar bör lämpligtvis bytas ut till typen 6-håls limmad i syfte att minska slitaget på både isolerskarv och vagnshjul.
- Samtliga växlar bör bytas till en växeltyp med rörlig korsningsspets i syfte att minska slitaget på både växelkorsning och på vagnshjul.
- Undersöka förutsättningar för en tyngre rälprofil som exempelvis 71E1 med en metervikt på 71 kg/m. Detta i syfte att möjliggöra för fler slipningar innan maximala slitagegränsen uppnås.
- Undersöka förutsättningar för ett byte av svetsmetod av rälsskarven. I dagsläget utförs termitsvetsning. Dock skulle ett byte till brännsvetsning leda till avsevärt färre utmattningsskador av rälsskarven vid högre axellaster, enligt *BHP*.

7.2 RÄLSBEFÄSTNINGAR

- En komponentinventering bör utföras för att säkerställa befintliga rälsbefästningars modell och position. Detta i syfte att kunna avgöra när ett eventuellt utbyte bör ske.
- De äldre modellerna av e-Clips och Heyback befästningarna bör vara dugliga vid rakspår för STAX 32,5. De bör dock succesivt bytas ut mot starkare rälsbefästningar. Vid ytterligare axellasthöjningar (högre än STAX 32,5) bör samtliga befästningstyper av denna sort vara utbytta.
- Mellanlägggen bör bytas från gummi till plast utav polyuretan (PU) eller högdensitets polyeten (HDPE). Styvheten i gummimellanlägggen är tillräcklig för STAX 32,5, men för högre axellaster krävs mellanlägg med högre styvhet.

- De starkare modellerna av e-Clips (e-Plus/e2000) och Fastclip FC1600 uppfyller kraven, vid användning av PU/HDPE mellanlägg för axellaster upp till STAX 35. Befästningstypen ska enligt tillverkaren Pandrol klara axellaster upp till och med STAX 40.
- För STAX 37,5 och högre bör det övervägas att använda ännu kraftigare befästningar i snäva kurvor och för att öka livslängden av befästningssystemet, exempelvis Fastclip FE RR.

7.3 SLIPRAR

- En förkortad livslängd förväntas på samtliga slipermodeller vid en axellastökning.
- Endast slipermodell A13 och A22 uppfyller vad som kravställs för STAX 37,5 och högre. Slipermodell S3, S7, A9 samt träslipers bör därför på sikt bytas ut till en slipermodell dimensionerad för högre axellast. I mest akut behov av utbyte är S3 och S7 slipern som inte uppfyller vad som kravställs för STAX 35.
- Det bör utföras hållfasthetsprov på samtliga slipermodeller i syfte att bestämma brottmoment i slipermitt och i rälläget. Bland annat saknas beräkningsunderlag för slipermodellerna S3 och S7.
- Ett maximalt tillåtet böjmoment i rälläget och slipermitt bör bestämmas för samtliga slipermodeller.
- En komponentinventering bör utföras i syfte att bestämma befintliga slipermodellens banposition.

7.4 BALLAST

- Ökad nedkrossning av ballasten kommer att ske vid en axellastökning.
- Ballastrening bör på sikt utföras. Detta i syfte att minska ballastens föroreningsgrad och därmed öka dess bärighet.
- Ballastdjupet längs hela bansträckan bör utökas till minst 50 cm. Detta är främst viktigt på bansträckor med svag undergrund.
- Underballastens djup ska vara minst 2,2 m för att förhindra tjälbildning i bankroppen. Tjälbildning kan också förhindras med hjälp av frostisolerande cellplast.
- Befintlig frostisolering kommer på sikt behöva underhållsåtgärder. En sådan åtgärd är bland annat att öka ballastdjupet, vilket resulterar i en lägre dynamisk belastning på isoleringen.
- Slipermattor bör installeras vid nyläggning av sliprar. Detta ger en mjukare förändring av spårstyvheten, vilket ger ett mindre dynamiskt tillskott och därmed minskad nedbrytning av samtliga bankomponenter. Slipermattor ökar även kontaktarean mellan slipern och ballasten, vilket har gynnsamma effekter på ballasten pga. mer utspridd belastning.

7.5 BANUNDERBYGGNAD

- En kartläggning av banundergrunden bör utföras i syfte att finna banpartier med otillräcklig bärighet. Förstärkningsåtgärder utförs vid behov.

- Stabilitetsberäkningar bör utföras vid varje axellasthöjning och på de banpartier där behovet finns bör förstärkningsåtgärder utföras. På banpartier med osäkert spåräge bör kontrollmätningar genomföras regelbundet.
- Kontinuerliga besiktningar av samtliga trummor bör utföras längs banan, samt kontrollmätningar av trummor belägna högt upp i bankroppen.
- Underhållsåtgärder bör utföras på trummor vid behov. Behovet ökar troligtvis med ökad axellast. Vid stora belastningsskador sker lämpligtvis ett utbyte av trumman. Förslagsvis byts trumman ut till en bantrumma, som klarar höga belastningar.
- En fullständig bärighetsutredning bör utföras på samtliga broar. På broar med undermålig bärighet bör förstärkningsåtgärder vidtagas alternativt utbyte av bron.

8 FORTSATT ARBETE

Arbetet har inkluderat flertalet förenklingar och avgränsningar. För att erhålla en mer omfattande bild av vad som krävs för respektive axellastökning rekommenderas fortsatt arbete inom ett antal områden. Dessa presenteras i punktform nedan.

- Utredning om ekonomiska aspekter för åtgärder som krävs för respektive axellasthöjning.
- Utredning om påverkan på signalsystem och kraftförsörjningssystem. Bland annat behöver troligtvis kraftförsörjningssystemet förbättras med tyngre tågvikt. Detsamma gäller signalsystemet som påverkas då bromstalen förändras.
- En mer djupgående utredning av påverkan vid axellastökning för varje enskild bankomponent. Denna rapport har fokuserat på helhetsbilden, det vill säga en detaljstudie av respektive bankomponent har inte varit tidsmässigt möjligt.
- Utredning om påverkan och utformning av lok och vagnar vid en axellastökning.
- Utredning av spårförhållanden och nödvändiga åtgärder vid en potentiell axellastökning på Malmabanans norra omlopp.

9 BILAGOR

9.1 BILAGA 1 - BERÄKNING AV NORMALSPÄNNINGEN I KONTAKTYTAN MELLAN HJUL OCH RÄL FÖR STAX 30

Beräkningarna är utförda på STAX 30 och rälsprofilen UIC 60.

Hjulradie på Fanoo-vagnen: $r_o = 0,443 \text{ m}$

Hjulradie i lateral riktning (Uppskattning): $r_\eta = 0,35 \text{ m}$

Rälradie i longitudinell riktning: $r_{\xi R} = \infty$

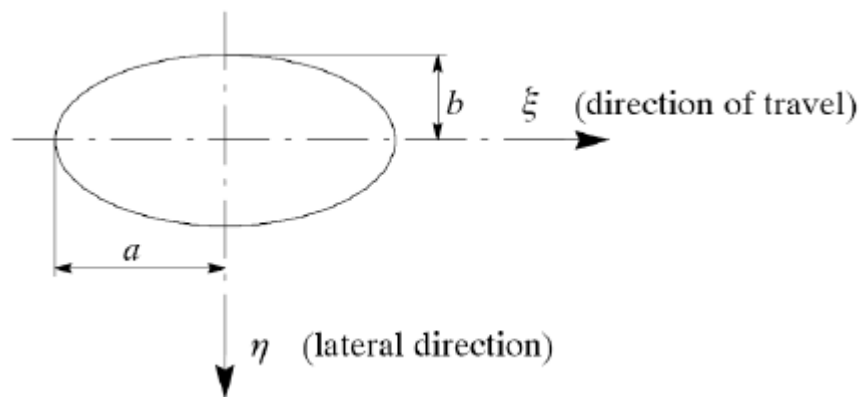
Radien för räls huvud på UIC 60 i lateral riktning: $r_{\eta R} = 0,3 \text{ m}$

Elasticitetsmodul (Stål): $E = 2 * 10^{11} \text{ Pa}$

Poissons konstant (Stål): $\nu = 0,25$

Normalkraft för axellast 30 ton: $N = 15 \text{ ton} = 150 \text{ kN}$

Hertz teorin används för att beräkna arean av kontaktytan mellan hjul och räl. [5]



Figur 51. Kontaktytan mellan hjul och räl, enligt Hertz teorin. [5]

$$A = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r_{\eta R}} - \frac{1}{r_\eta} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{0,3} - \frac{1}{0,35} \right) = 0,238$$

$$B = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r_{\xi R}} + \frac{1}{r_o} \right) = \frac{1}{2r_o} = \frac{1}{2 * 0,443} = 1,129$$

Kontaktytan mellan hjul och räl antar formen av en ellips med semiaxlarna a och b , se Figur 51.

$$a = m * \sqrt[3]{\frac{3N(1-\nu^2)}{2E(A+B)}} = 0,53 * \sqrt[3]{\frac{3}{2} * \frac{150 * 10^3}{2 * 10^{11}} * \frac{(1-0,25^2)}{(0,238 + 1,129)}} = 4,86 \text{ mm}$$

$$b = n * \sqrt[3]{\frac{3N(1-\nu^2)}{2E(A+B)}} = 2,397 * \sqrt[3]{\frac{3}{2} * \frac{150 * 10^3}{2 * 10^{11}} * \frac{(1-0,25^2)}{(0,238 + 1,129)}} = 21,98 \text{ mm}$$

Där m och n är konstanter som erhålls ur Hertz tabellen.

Arean av kontaktellipsen fås av följande.

$$A = \pi ab = \pi * 4,86 * 21,98 = 335,6 \text{ mm}^2$$

Maximala normalspänningen i kontaktytan mellan hjul och räl ges av.

$$\sigma_{max} = \frac{3}{2} * \frac{N}{A} = \frac{3}{2} * \frac{150 * 10^3}{335,6 * 10^{-6}} = 670 \text{ MPa}$$

Den maximala normalspänningen mellan hjul och räl vid 30 tons axellast är således 670 MPa.

9.2 BILAGA 2 - BERÄKNING AV MAXIMALA BÖJSPÄNNINGEN I RÄLSFOTEN FÖR STAX 30

Beräkningarna sker på böjspänningen i rälsfoten vid kurvtagning.

Rälens böjstyvhet för UIC 60.

$$EI = 6,42 * 10^6 [\text{Nm}^2]$$

K varierar mellan 9-90 [N/mm^2] beroende på kvalitén av banundergrunden.

k väljs efter antagandet av medelbra banundergrund.

$$k = 49,5 \text{ N/mm}^2$$

Böjmotståndet relativt rälsfoten.

$$W_{yf} = 377 \text{ cm}^3$$

Rälens karakteristiska längd:

$$L = \sqrt[4]{\frac{4 * 6,42 * 10^6}{49,5 * 10^6}} = 0,85 \text{ m}$$

Den effektiva hjullasten vid STAX 30:

$$Q = 15 * 10^3 * 9,81 * (1,3 + 1,2) = 2,2 * 10^5 \text{ N}$$

Detta ger maximala böjspänningen i rälsfoten vid kurvtagning:

$$\sigma_{max} = \frac{2,2 * 10^5 * 0,85}{4 * 377 * 10^{-6}} = 124 \text{ MPa}$$

9.3 BILAGA 3 - BERÄKNING AV KONTAKTSPÄNNINGEN MELLAN RÄLSFOT OCH SLIPER PÅ BETONGSLIPERS AV TYPEN S7 FÖR STAX 30

UIC 60 har en fotbredd på 150 mm.

Betongslipern S7 har vid rälläget bredden 150 mm.

Antag att tryckkraften från hjullasten fördelas på hela ytan av rälen. Arean mellan rälsfoten och slipern.

$$A_{max} = 150 * 150 = 22\,500 \text{ mm}^2$$

$$\text{Med STAX 30: } Q = \frac{30 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m}^2 / \text{s}^2}{2} = 147,2 \text{ kN}$$

$$\text{Den maximala spänningen: } \sigma_{max} = \frac{147,2 \cdot 10^3 \text{ N}}{22500 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} = 6,6 \text{ MPa}$$

9.4 BILAGA 4 - BERÄKNING AV BÖJMOMENTET I RÄLLÄGET OCH SLIPERMITT FÖR STAX 30

$$\text{Den nedåtriktade kraften vid STAX 30: } Q = mg = 30 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m}^2 / \text{s}^2 = 294,3 \text{ kN}$$

Axellasten fördelas mellan sliprarna, där den maximalt belastade slipern precis under hjulet tar ungefär 40 % av den totala axellasten, enligt Figur 29.

$$Q_{sliper} = 294,3 \text{ kN} \cdot 0,4 = 117,72 \text{ kN}$$

Detta ger meterkraften på slipern:

$$p = \frac{Q_{sliper}}{\ell} = \frac{117,72}{2,5} = 47,1 \text{ kN/m}$$

$$\text{Momentet i rärläget bli: } M_s = \frac{pa^2}{2} = \frac{47,1 \cdot 0,5^2}{2} = 5,89 \text{ kNm}$$

Böjmomentet på slipermitt för STAX 30 blir enligt följande.

$$M_f = M_s - \frac{p(\ell - 2a)^2}{8} = 5,89 - \frac{47,1 \cdot (2,5 - 2 \cdot 0,5)^2}{8} = -7,36 \text{ kNm}$$

9.5 BILAGA 5 - BERÄKNING AV KONTAKTSPÄNNINGEN MELLAN UNDERLÄGGSPLOTTAN OCH TRÄSLIPERN FÖR STAX 30

Kontaktarean mellan underläggsploTTan för Heyback-befästningen och slipern är:

$$A = 56\,100 \text{ mm}^2$$

Den effektiva hjullasten för STAX 30 vid 40 km/h ges av:

$$Q = \frac{1,26 \cdot 30 \cdot 10^3 \cdot 9,81}{2} = 185,4 \text{ kN}$$

Den maximala spänningen:

$$\sigma_{max} = \frac{185,4 \cdot 10^3 \text{ N}}{56\,100 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} = 3,3 \text{ MPa}$$

9.6 BILAGA 6 - BERÄKNING AV TRYCKET I KONTAKTYTAN MELLAN SLIPERS OCH BALLAST FÖR STAX 30

För STAX 30 görs följande beräkningar föra att få ut ballasttrycket.

$$\text{Hjullasten: } Q = \frac{30}{2} = 15 \text{ ton} = 150 \text{ kN}$$

Sliperavståndet: $a = 0,6 \text{ m}$

Den bärande yta på slipern per räl: $F = 0,35 \text{ m}^2$. Här antas att det överförs ett jämnt tryck från slipern till ballasten. Detta är en grov approximation.

Enligt [47] är bäddmodulen för järnvägsspår $C = 100 - 350 \text{ MPa/m}$. Bäddmodulen på Malmbanan väljs till $C = 100 \text{ MPa/m}$.

Elasticitetsmodulen för stål: $E = 2 * 10^{11} \text{ Pa}$

Tröghetsmomentet per räl [3]: $I = 30,6 * 10^{-6} \text{ m}^4$

Detta ger ballasttrycket: $p = 0,6 * 150 * 10^3 * \sqrt[4]{\frac{0,6^3}{0,35^3} * \frac{100 * 10^6}{2 * 10^{11} * 30,6 * 10^{-6}}} = 0,27 \text{ MPa}$

9.7 BILAGA 7 - ISOLERSKARVAR LÄNGS MALMBANANS SÖDRA OMLOPP

Isolerskarvarna längs Malmbanans södra omlopp presenteras i Tabell 28 nedan.

Tabell 28. Isolerskarvar längs Malmbanans södra omlopp år 2013. [18]

Typ	Bandel 114	Bandel 118	Bandel 119	Bandel 120	Bandel 122
Exel	20	42	27	1	0
Fiber	2	0	3	0	0
Limmad 4-håls	4	1	0	3	0
Limmad 6-håls	28	175	75	31	11
Mt-4	19	8	12	2	1
Permal	10	2	3	0	6
Scotchplate	8	0	0	0	0

9.8 BILAGA 8 - STABILITETSBERÄKNINGAR UTFÖRDA FÖR PILOTPROJEKTET FÖR STAX 32,5 OCH GENOMFÖRDA STABILITETSÅTGÄRDER SEDAN 30 TON PÅ MALMBANAN

Stabilitetsberäkningar genomförda för pilotprojektet för STAX 32,5 visas i Tabell 29 nedan. Beräkningarna är genomförda med trafiklasten $69,3 \text{ kN/m}^2$.

Tabell 29. Genomförda stabilitetsberäkningar. År 2014 [16]

Bandel	Sektion	Sträcka/ läge	Fc STAX 30	Prio enl STAX 30	Fc STAX 32,5	FKOMB STAX 32,5	Kommentar
118	1155+850	Holmfors- Ljuså	1,63		1,44	1,3	
118	1185+380	Sandträsk- Gullträsk		3			Fast under bank.
118	1235+000	Murjek- Polcirkeln			0,99	1	Redan åtgärdad!

118	1239+700	Murjek-Polcirkeln		2		1,18	Redan åtgärdad? Kontrolleras på plats
118	1241+400	Murjek-Polcirkeln	1,16	3	1,14		Bör provtas genom bank
118	1248+740	Loumbetjokk	1,28		1,21	1,12	
118	1251+260	Polcirkeln-Nattavaara	1,32	3	1,3	1,29	
118	1258+000	Polcirkeln-Nattavaara		3	1,53	1,3	OK, hast nedsättning
118	1258+680	Polcirkeln-Nattavaara		3	1,57	1,53	Ok, redan utförd
118	1261+000	Polcirkeln-Nattavaara	1,79	3		1,6	
118	1267+070	Nattavaara-Nuortikon	1,69		1,44	1,35	Åtgärdas under året
118	1270+620	Nattavaara-Nuortikon		2	1,27	1,27	Åtgärd krävs mot vänster och höger. På höger sida finns tryckbank som behöver kompletteras
118	1277+940	Nattavaara-Nuortikon		3	1,61	Ca 1,5	OK
118	1279+820	Nattavaara-Nuortikon		3	1,61	1,46	Ok
118	1280+680	Nattavaara-Nuortikon	1,87		1,83	1,44	Ok Båda sidor åtgärdade 1997
118	1280+680	Nattavaara-Nuortikon	2,28		1,81	1,7	Ok
118	1284+790	Nuortikon-Ripats	1,17		1,17	1,11	Beräkningsresultat avser oförstärkt bank. Förstärkning utförs enligt strixfilm.
118	1287+400	Ripats-Gällivare			1,46	1,5	Åtgärdad 1997. Ok om v _{max} < 60 km/h.
118	1298+580	Ripats-Gällivare	1,54	3	1,37/1,39	1,57/1,62	Bör förstärkas mot vänster
118	1300+600	Ripats-Gällivare		3	1,62	1,42	Ok
119	1149+080	Boden-Sävast	1,69		1,5	1,38	Ok om v _{max} < 60 km/h. Annars krävs kulvertering.
119	1157+640	Boden-Sävast	1,1	3	1,06	1,1	
119	1158+640	Boden-Sävast	1,54		1,38	1,15	Bör åtgärdas under året. Red hast.

119	1159+420	Sävast-Sunderbyn	1,2		1,15	1,21	Redan åtgärdad? Kontrolleras på plats.
119	1167+180	Sunderbyn-Gammelstad	1,27	3	1,22	1,22	Bör sonderas för att ev kunna utelusta förstärkning
120	1144+790	Malmspåret	1,34		1,34	1,33	Provtagning i bankfot.
120	1148+300	Buddbyn	2,4		1,35	1,11	
120	1148+820	Buddbyn	1,53		1,31	1,28	

De genomförda åtgärderna sen 30 ton på Malmbanan enligt arkivstudie i BIS redovisas i Tabell 30. [16]

Tabell 30. Förstärkta sektioner sedan 30 ton på Malmbanan enligt BIS. År 2014 [16]

Sträcka	Åtgärd
1234+840 -1235+160	Tryckbank båda sidor utlagd 1997
1234+940 – 1235+060	Träspont utförd 1997, (oklart om båda sidor om spåret, troligen)
1280+310 – 1280+400	Båda sidor utlagd 1997
1280+300 – 1280+390	Träspont utförd 1997, båda sidor om spåret
1284+760 – 1284+850	Vänster sida, utlagd?
1284+810 – 1284+890	Vänster sida, utlagd 1997
1287+380 – 1287+440	Båda sidor, utlagda 1997
1287+390 – 1287+430	Träspont utförd 1997, båda sidor

9.9 BILAGA 9 - KURVRADIER FÖR RESPEKTIVE BANDEL LÄNGS MALMBANANS SÖDRA OMLOPP

Tabell 31. Antal kurvor och kurvradier för respektive bandel längs Malmbanans södra omlopp. [18]

Kurvradie	Bandel	Antal	Medellängd	Medelradie
<450 m	114	2	411	401
	118	15	171	391
	120	1	78	395
	122	2	62	365
450 – 550 m	114	2	525	482
	118	33	142	496
	119	1	180	484
550 – 650 m	114	8	267	590
	118	35	172	596
	119	2	98	642
	120	1	331	595
	122	2	82	605
650 – 750 m	114	1	175	742
	118	10	86	702

750 – 1000 m	114	1	298	780
	118	46	118	893
	119	7	187	894
	120	4	211	859
	122	2	118	829

10 REFERENSER

- [1] A. Wahlberg, Utbildning: Uppgradering av järnvägsanläggning., Luleå: Sweco Luleå, 2015.
- [2] B. Lichtberger, Track Compendium, Hamburg: Eurailpress, 2005.
- [3] H. Sundquist, Byggande, Drift och Underhåll av Järnvägsbanor, Stockholm: Byggkonstruktion KTH, 2003.
- [4] S. Witt, "The Influence of Under Sleeper Pads on Railway Track Dynamics," Linköping University, Linköping, 2008.
- [5] E. Andersson, M. Berg och S. Stichel, Rail Vehicle Dynamics, Stockholm: Railway Group KTH, 2013.
- [6] S. Stichel, "Ökade laster med hänsyn till spårnedbrytning," Järnvägsgruppen KTH, Stockholm, 2004.
- [7] T. Dahlberg, "Railway Track Stiffness Variations - Consequences and Countermeasures," Linköpings Universitet, Linköping, 2009.
- [8] E. Berggren, "Railway Track Stiffness - Dynamic Measurements and Evaluations for Efficient Maintenance," KTH, Stockholm, 2009.
- [9] P.-O. Larsson-Kråik, "Managing the wheel-rail interface: Railway infrastructure maintenance in a severe environment: The Swedish experience," i *Wheel-Rail interface handbook*, Woodhead Publishing Materials, 2009, pp. 633-652.
- [10] Trafikverket, "Trafikverket," Trafikverket, 24 01 2014. [Online]. Available: <http://www.trafikverket.se/resa-och-trafik/jarnvag/Sveriges-jarnvagsnat/Malmbanan/>. [Använd 02 11 2015].
- [11] LKAB, "LKAB investerar i nya tågsätt och ecodriving," LKAB, 21 November 2011. [Online]. Available: <http://www.lkab.com/sv/Press/Koncernnyheter/?ni=7791&c=&m=>. [Använd 03 November 2015].
- [12] S. Kallander, Interviewee, *Mailintervju angående räilstål*. [Intervju]. 21 September 2015.
- [13] Tata steel, *Rail technical guide*, Scunthorpe: Tata steel, 2014.
- [14] SWECO RAIL AB, "Slutrapport Banöverbyggnad Uppdragsnummer 7501193300," Sweco, Luleå, 2015.
- [15] A. Wahlberg, Interviewee, *Telefonmöte*. [Intervju]. 9 Oktober 2015.
- [16] Sweco, "TILLSTÅNDSBEDÖMNING INFÖR PROVkörNING STAX 32,5 TON, Teknikområde Geoteknik: Konsekvenser på banunderbyggnad och ballast," Sweco, Luleå, 2014.
- [17] Banverket, "30 ton på Malmbanan," Banverket, Luleå, 1996.

- [18] Sweco, "UNDERLAGSRAPPORT TILL ANSÖKAN OM PROVKÖRNING MED 32,5 TON," Sweco, Luleå, 2013.
- [19] Trafikverket, "Broar - Malmbanan 32,5 ton Gällivare-Luleå," Trafikverket, Luleå, 2013.
- [20] S. Iwnicki, Handbook of Rail Vehicle Dynamics, Boca raton, FL: CRC Press, 2006.
- [21] Sweco, "PM - 35 TONS AXELLAST PÅ RÄLER TYP 50E3 & 60E1," Sweco Rail AB, Luleå, 2014.
- [22] S. Sahlin och H. Sundquist, "Banmekanik," Kungl Tekniska Högskolan Institutionen För Byggkonstruktion, Stockholm, 2000.
- [23] C. Esveld, Modern Railway Track, Zaltbommel: MRT-Productions, 2001.
- [24] Australian Rail Track Corporation LTD, Rail Defects Handbook, Australien: Australian Rail Track Corporation LTD, 2006.
- [25] J. J. Kalker, D. F. Cannon och O. Orringer, Rail Quality and Maintenance for Modern Railway Operation, Delft: Springer-Science+Business Media, B.V., 1992.
- [26] T. Åhrèn, "Utvärdering av underhållskostnad för hjul och räl på sträckan Kiruna-Riksgränsen," Institutionen för Väg- och Vattenbyggnad, Luleå Tekniska Universitet, Luleå, 2002.
- [27] W. Wang, H. Guo, X. Du, J. Guo, Q. Liu och M. Zhu, "Investigation on the damage mechanism and prevention of heavy-haul railway rail," Southwest Jiotong University, Chengdu, China, 2013.
- [28] R. Ridley, "National Competition Council," 4 October 2004. [Online]. Available: <http://ncc.gov.au/images/uploads/DeRaFoAp-0021.pdf>. [Använd 5 Oktober 2015].
- [29] Y. Sato, "Benefits of heavy rails on high-speed railways and design of 75G rail using coordinates," Elsevier, Tokyo, 1995.
- [30] V. Profillidis, Railway Management and Engineering, Democritus Thrace University, Greece: Ashgate Publishing Company, 2014.
- [31] Pandrol Track Systems, "RAIL FASTENINGS FOR HEAVY HAUL APPLICATION," Pandrol, Addlestone, 2013.
- [32] Pandrol, *FASTCLIP FERR*, Addlestone: Pandrol, 2015.
- [33] M. Skoglund, Interviewee, *Mailintervju angående sliprar*. [Intervju]. 22 September 2015.
- [34] Sweco, "PM 35 TON PÅ BETONGSLIPER TYP S7 SAMT BEFÄSTNINGAR PÅ BETONG- OCH TRÄSLIPRAR," Sweco, Luleå, 2014.
- [35] D. Li, J. Hyslip, T. Sussmann och S. Chrismer, Railway Geotechnics, Boca Raton: CRC Press, 2015.
- [36] INFRANORD, "Ballastrening för ett bra spårläge," INFRANORD, Solna, 2012.

- [37] C. González-Nicieza, M. Álvarez-Fernández, A. Menéndez-Díaz, A. Álvarez-Vigil och F. Ariznavarrenta-Fernández, "Failure analysis of concrete sleepers in heavy haul railway tracks," *Engineering Failure Analysis*, vol. 15, pp. 90-117, 2008.
- [38] P. Alves Costa, R. Calcada och S. Cardoso, "Ballast mats for the reduction of railway traffic vibrations. Numerical study," University of Porto, Porto, 2011.
- [39] Trafikverket, TRV Geo, Trafikverkets tekniska krav för geokonstruktioner, Stockholm: Trafikverket, 2011.
- [40] L. Pettersson och H. Sundquist, Dimensionering av rörbroar, Stockholm: Institutionen för byggkonstruktion, KTH, 2000.
- [41] railcare, "Lining," railcare, Skelleftehamn, 2013.
- [42] H. Sundquist, Infrastrukturkonstruktioner, Stockholm: Byggkonstruktion KTH, 2007.
- [43] Trafikverket, "Batman.vv.se," Trafikverket, 12 November 2015. [Online]. Available: <https://batman.vv.se/batman/logon/logon.aspx?url=https://batman.vv.se/batman/>. [Använd 17 November 2015].
- [44] O. Grönqvist, "Förstärkning av bro 17-803-1 - En jämförelse av förstärkningsmetoder," Karlstad Universitet avd Byggingenjör, Karlstad, 2011.
- [45] J. Silfwerbrand, "Aktivt brounderhåll - En förstudie," Kungliga Tekniska Högskolan Avdelning Byggkonstruktion, Stockholm, 2002.
- [46] P.-O. Larsson Kråik, Interviewee, *Muntlig konversation angående geoteknik*. [Intervju]. 13 Oktober 2015.
- [47] G. Kumaran, D. Menon och K. K. Nair, "EVALUATION OF DYNAMIC LOAD ON RAILTRACK SLEEPERS BASED ON VEHICLE-TRACK MODELING AND ANALYSIS," *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, vol. 2, nr 3, pp. 355 - 374, 2002.
- [48] Dupont, "Durable Rail Pads for Freight Lines," Dupont, 1 Januari 2015. [Online]. Available: <http://www.dupont.com/products-and-services/plastics-polymers-resins/thermoplastics/case-studies/durable-rail-pads-for-freight-lines.html>. [Använd 3 November 2015].
- [49] E. T. Selig, "Bild från Subgrade Properties," 2013.

TSC-MT16-001

www.kth.se