



KTH Electrical Engineering



BANVERKET

Kriterier för spänningen i banmatningsnät

Criteria for the voltage in railway power supply systems

Niklas Biedermann

Examensarbete

XR-EE-EME 2010:002

Kungliga Tekniska Högskolan

Skolan för elektro- och systemteknik,

Avdelningen för elektriska maskiner och effektelektronik

Stockholm, januari 2010.

2. upplagan, Stockholm, maj 2010.

Examensarbetet har utförts hos Banverket i Sundbyberg med Peter Deutschmann, Banverket expert och utveckling, elkraftsystem, som handledare.

Professor Stefan Östlund, avdelningen för elektriska maskiner och effektelektronik, har varit handledare på KTH samt examinator.

Förord till andra upplagan

Vid fortsatt arbete visade det sig att Rc-lokens spänningsberoende egenskaper, dragkraftsreduceringen, var felaktig. Av den anledningen har arbetet uppdaterats med nya dragkraftskurvor och en förändrad beskrivning av loken. I resten av arbetet används fortfarande de tidigare dragkraftskurvorna (figur 7-1), vilket också visar lokmodellen med vilken alla simuleringar gjorts. Med den nya modellen skulle den främsta skillnaden i simuleringarna vara att Rc-loket blir mindre känsligt för spänningar under 13,5 kV samt att det inte längre kommer att fastna i en stigning endast på grund av dålig spänning.

Detta påverkar dock på inget sätt resonemangen eller arbetets resultat.

Sundbyberg, maj 2010.

Niklas Biedermann

nb@kth.se

Sammanfattning

Merparten av tågtrafiken i Sverige drivs elektriskt och trafiken ökar vilket kräver utbyggnader av kraftförsörjningssystemet. Dock har det varit ett problem att kunna bedöma kapaciteten i kraftförsörjningssystemet inför både förstärkningar och nyelektrifieringar. Av denna anledning behövs kriterier mot vilka kapaciteten systematiskt kan analyseras. De enda formella kriterierna är generella normkrav. Utöver det innehåller normerna också ett kvalitetsmått, $U_{\text{mean useful}}$, som dock, för Banverkets del, har visat sig vara oanvändbart i praktiken.

Med simuleringar visas att sambandet mellan ett spänningsmedelvärde som $U_{\text{mean useful}}$ och tågets försening gentemot trafik med ideal spänning är mycket lågt vid blandad trafik och kraftiga spänningsvariationer. Det beror på att ett medelvärde över alla spänningar är en olämplig metod då två olika tåg kan påverkas helt olika av en låg spänning. En låg spänning sänker ett loks effekt och därmed dragkraft medan en hög spänning inte kan öka dragkraften utöver lokets normala prestanda. På så sätt kan en låg spänning orsaka förseningar men en hög spänning kan inte minska redan existerande förseningar. Vidare är känsligheten för en låg spänning helt olika beroende på loktypen, tågets vikt, hastigheten och sträckans geometri samt också uppehållsmönstret. Utgående från spänningen kan man endast säga att ett värde över 14,25 kV sannolikt inte påverkar trafiken negativt. Att alltid kunna tillhandahålla denna spänning är dock ett högt krav som kostar mycket att genomföra men till begränsad nytta.

I simuleringar av olika typer av sträckor och med olika fordon visas också att tåget med sämst spänning inte behöver vara det som försenas mest, utan det är tåget där dragfordonet belastas mest i förhållande till sin normala prestanda i kombination med spänningen.

För att kunna skapa kriterier som inbegriper även lokets prestanda undersöks hur prestandan påverkas av spänningen. Med hjälp av detta skapas verktyg för att systematiskt kunna analysera belastningen och prestandan vid varierande spänning. De förslag som presenteras är lokets belastningsgrad som visar hur stor del av den tillgängliga dragkraften som behövs i varje ögonblick och accelerationsmarginalen vilken beskriver hur stor acceleration som är möjlig vid varje tidpunkt. Dessa jämförs sedan vid ideal spänning och verklig spänning.

Utöver detta ges också förslag till bättre spänningsmedelvärden. Vidare diskuteras andra aspekter för utvärderingen av kraftförsörjningsanläggningen, bland annat hur olika långa tidsintervall över vilka utvärderingen sker påverkar resultatet.

Abstract

Most of the railway traffic in Sweden is powered by electricity. The increase in train operation requires an expansion of the power supply system. However, it has been a problem to estimate the capacity of the power system, both for improving the existing grid and for new electrifications. As a consequence there is a need for criteria by which the capacity of the power system can be analyzed systematically. The only formal criteria are general standards. The standards also contain a quality index for the power supply referred to as, $U_{\text{mean useful}}$, that from Banverket's point of view, has shown not to be useful in practice.

With simulations it is shown that the relation between a mean value of the voltage, like $U_{\text{mean useful}}$, and the delay of trains, compared to traffic with ideal voltage, is very weak. This applies mainly for mixed traffic and high voltage variations due to the fact that a mean value of all voltages is an unsuitable method because two different trains can be affected completely different by the same low voltage level. A low voltage level reduces the power, and by that the tractive effort, of a locomotive whereas a high voltage cannot raise the tractive effort above the normal performance of the locomotive. As a consequence a low voltage can cause delays but a high voltage can never reduce already existing delays. Furthermore, the sensitivity for a low voltage level is different for various trains and depends on the locomotive, the weight of the train, the speed and the geometry of the track, mainly the gradient. The number of stops plays a significant role as well. By only taking the voltage into consideration, the only conclusion that can be drawn is that it is likely that a voltage above 14,25 kV will not negatively influence the traffic. But to always be able to supply this voltage is a very strong requirement which is very expensive to attain and besides, the advantages are rather limited.

By simulation of different types of railway lines with different types of rolling stock it has been shown that the train with the lowest voltage level does not have to be the train that is delayed most. In general, it is the train with the highest load in comparison to the normal load, that is most influenced by a low voltage.

In order to develop criteria that also include the performance of the locomotives, it is examined how the voltage influences the performance. These results are then used to develop tools for systematic analysis of the load and performance during varying voltages. The suggested methods are the degree of load of the locomotive which shows how much of the available tractive effort that is used, and the margin of acceleration that describes the possible acceleration at each moment. These values are then compared at an ideal and real voltage.

In addition, better mean values of the voltage level are also suggested. Furthermore, other criteria are discussed, among others how different evaluation intervals affect the result.

Innehåll

1	Inledning.....	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Syfte	1
1.3	Omfattning och avgränsning	1
1.4	Metod	1
1.5	Tidigare Arbeten	2
2	Järnvägens kraftförsörjning.....	3
2.1	Historik och bakgrund.....	3
2.2	Nätets uppbyggnad.....	3
2.3	Matningsstationer	4
2.3.1	Roterade omformare.....	4
2.3.2	Omriktare	5
2.4	Kontaktledning och återledning	6
2.4.1	Översikt	6
2.4.2	Endast räler.....	7
2.4.3	Räler och separat återledning	7
2.4.4	Räler och sugtransformator	8
2.4.5	Återledning och sugtransformator.....	8
2.4.6	Autotransformator	9
2.5	Nätets kapacitet	9
3	Krav på spänningen i banmatningsnät	11
3.1	Inledning.....	11
3.2	Operatörernas krav på spänningen	11
3.3	Tidtabellsplaneringens krav på spänningen	11
3.4	Normkrav på spänningen	12
3.4.1	TSD-normer	12
3.4.2	Europannormer	12
4	Simulering med Tracfeed	17
4.1	Simulering och dimensionering hos Banverket	17
4.2	Tracfeed/Simpow	17
4.2.1	Lokens prestanda i Tracfeed	17
4.3	Simuleringarna i detta arbete.....	19
5	Fordon	21
5.1	Fordonstyper.....	21
5.2	Kontaktor- eller lindningskopplarlok.....	21
5.3	Tyristorlok	22
5.4	Asynkronlok	22
5.5	Traktionsmotorn	22
5.5.1	Egenskaper av en traktionsmotor	22
5.5.2	Asynkronmotor.....	22
5.5.3	Likströmsmotor	23
5.6	Spänningens prestandapåverkan	23
5.6.1	Spänningens påverkan på dragkraft och effekt	23
5.6.2	Dragkraftskurvor som funktion av spänningen.....	23
5.6.3	Effekt som funktion av spänning	29
5.6.4	Effekter av strömbegränsningen.....	29
6	Utvärdering av kontaktledningsspänningen	31
6.1	Inledning och förutsättningar	31

6.2	Simulering Långsele - Vännäs	31
6.2.1	Beskrivning av sträckan och förutsättningarna	31
6.2.2	Resultat.....	34
6.3	Simulering Uppsala-Gävle	36
6.3.1	Beskrivning av sträckan och förutsättningarna	36
6.3.2	Resultat.....	38
6.4	Jämförande simulering Långsele - Vännäs och Hallsberg - Falköping	40
6.4.1	Beskrivning av sträckan och förutsättningarna	40
6.5	Problem vid utvärderingen av kraftförsörjningen	43
6.5.1	Nackdelen med $U_{\text{mean useful}}$	43
6.5.2	Värderingen av en försening	44
7	Faktorer som inverkar på körtiden och loks prestanda	45
7.1	Identifiering av faktorer som inverkar på körtiden	45
7.2	Loks prestanda.....	46
7.3	Metoder för att åskådliggöra tillgången eller bristen på prestanda	47
7.3.1	Accelerationsmarginal.....	47
7.3.2	Belastningsgrad	47
7.3.3	Hastighetsreferens	48
7.3.4	Specifik effekt	48
7.4	Accelerationsmarginal.....	48
7.4.1	Gångmotstånd.....	49
7.4.2	Accelerationskraft	49
7.5	Belastningsgrad	50
7.6	Sammanfattning av krafterna i ett dragkraftsdiagram.....	51
7.6.1	Fall A.....	52
7.6.2	Fall B.....	52
7.6.3	Fall C.....	53
7.7	Grafisk presentation av accelerationskraften	53
7.8	Grafisk presentation av tidigare beskrivna variabler med data från Tracfeed	56
7.8.1	Utdata från Tracfeed.....	56
7.8.2	Belastningsgrad och accelerationsmarginal, absoluta värden	57
7.8.3	Belastningsgrad och accelerationsmarginal, relativa värden	59
8	Utvärderingskriterier	63
8.1	Allmänna krav på utvärderingskriterier	63
8.2	Utvärderingssituationer	64
8.2.1	Utvärdering av simuleringsresultat	64
8.2.2	Mätningar	64
8.2.3	Prognosverktyg.....	65
8.3	Utvärderingskriterier	65
8.3.1	Utvärderingsperiodens längd.....	66
8.3.2	Prestandaparametrar för tåg	66
8.3.3	Förlängning av körtiden	71
8.3.4	Spänningsmått	71
8.3.5	Övriga, förkastade mått	74
8.4	Implementering	74
8.4.1	Simulering	74
8.4.2	Mätning	75
8.5	Krav	75
9	Slutsatser och förslag till fortsatt arbete.....	77
9.1	Slutsatser	77

9.2	Förslag till fortsatt arbete	78
10	Källor.....	79
10.1	Tryckta källor	79
10.2	Webbkällor	80
10.3	E-post eller muntliga källor.....	80
	Appendix	81
	Appendix A Dragkraftskurvor som funktion av spänningen	81
	Appendix B Simuleringsbeskrivningar	81
	Jämförande simulering Långsele - Vännäs och Hallsberg - Falköping	81
	Långsele - Vännäs	82
	Uppsala-Gävle	82
	Appendix C Accelerationskraft.....	82
	Appendix D Manuell beräkning av $U_{\text{mean useful}}$	83

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Vid dimensionering av banmatningsnät vid Banverket beräknas tågets effektbehov utifrån dess mekaniska egenskaper. Med effekten görs sedan en lastflödesberäkning i kontaktledningsnätet och i 132 kV matarledningsnätet. Resultatet är strömmar i alla linjer och spänningar i noderna. Hela bräkningen där fordonsegenskaper, bandata och tidtabellen är indata sker i TracFeed/SIMPOW.

För dimensionering av banmatningsnät används ett mått på spänningen vid lokets strömavtagare $U_{\text{mean useful}}$. Måttet är ett medelvärde vilket i extremfall kan betyda att kravet är uppfyllt fastän tåget tillfälligt fastnar i en backe på grund av för låg spänning.

Således är detta mått inte särskilt användbart vid dimensionering av banmatningsnätet då det inte tar hänsyn till kundernas, operatörernas, intressen.

Dessa är egentligen inte intresserade av en viss kontaktledningsspänning utan de vill veta på vilken tid de kan komma från A till B med det tågsätt de tänkt köra (typ av lok, tågvikt etc.) och givetvis att spänningen inte skadar dragkraften. Tågsättet kan ha olika egenskaper och således ställa olika krav på tillgänglig effekt beroende på hastighet, tågvikt, gångmotstånd etc.

För Banverkets del kan banmatningen utgöra en kapacitetsbegränsning, antingen genom att ett tåg fastnar eller genom att hastigheten blir lägre och banans kapacitet därmed sjunker. Banmatningen kan även begränsa tågvikterna eller möte av två tunga tåg.

I dagsläget finns inget lämpligt krav som förenar operatörernas intressen och anläggningens elektriska egenskaper. Frågan är på vilket sätt ett lämpligare mått kan definieras och hur detta ska vara formulerat för att utifrån indata (tågsättets och banans egenskaper) och utifrån simuleringsdata kunna ge information om en befintlig banas kapacitet och information om hur banmatningsnätet måste förändras (förstärkas) för att nå upp till de ställda kraven.

1.2 Syfte

Examensarbetets syfte är att utveckla praktiskt användbara utvärderingskriterier vid dimensionering av banmatningssystem utöver befintliga standardkrav.

1.3 Omfattning och avgränsning

Arbetet omfattar identifiering av hur olika spänning påverkar möjligheten att köra trafik och vilka möjligheter som finns för att kvantifiera detta. Formulering av absoluta värden för kraven ligger utanför detta arbetets område. I arbetet ingår inte att utvärdera befintliga modeller som används vid simuleringen. I rapporten beaktas endast spänningen och förutsätter att tillräcklig effekt finns tillgänglig och att anläggningen tål de resulterande strömmarna.

1.4 Metod

Arbetet består dels av litteraturstudier för att utröna om liknande arbeten har gjorts, dels av simuleringar för att studera hur trafiken påverkas av varierande spänning och ur detta utveckla formella krav. Genom ytterligare simuleringar studeras hur dessa krav sedan kan användas för att värdera möjligheterna att köra trafik utan störningar.

1.5 Tidigare Arbeten

Det finns i princip inga arbeten där spänningens påverkan på olika tågtyper har studerats systematiskt. Däremot är rapporter vanliga där kraftsystems kapacitet analyserats för att de ska hålla en viss spänning vid en viss trafik. Dessa undersöker vanligtvis inte hur andra spänningar påverkar möjligheten att köra trafiken.

Jernbaneverket (JBV) i Norge har undersökt om man bör ställa andra krav på spänningsnivåerna i kraftförsörjningsanläggningen. De har däremot inte studerat hur olika tåg påverkas av olika spänningar och om ett krav på en kraftförsörjningsanläggning även går att se som ett krav på fordonen. Jernbaneverkets arbete¹ resulterade i regler för projektering². Resultaten har bland annat använts i en utredning av kraftförsörjningen av Ofotbanen³ (Malmbanan).

Jernbaneverkets resultat är ett spänningskrav som $U_{\text{mean useful}}$ bara att en högre spänning krävs i vanliga fall. Dessutom har de ändrat miniminivåer. Kravet finns i två nivåer beroende på banans status men används över hela nätet oberoende av lokala förutsättningar. JBV har även utrett bortfall av komponenter och dess påverkan på spänningen. Deras krav tar inte hänsyn till fordonens egenskaper.

I en artikel i Elektrische Bahnen, Bahnelektroenergieversorgung und Eisenbahnbetrieb⁴ undersöks bland annat vilka tågtätheter som är möjliga beroende på banans strömförsörjning. I arbetet studeras dock inte hur tåget påverkas av spänningen utan det förutsätts att tåget kan utnyttja det användbara spänningsfallet. Som användbart spänningsfall används $0,2 \cdot U_{\text{nom}}$, vilket är skillnaden mellan $U_{\text{max}} = 16,5 \text{ kV}$ och $U_{\text{min}} = 13,5 \text{ kV}$ enligt UIC 796-0 för höghastighetståg.

På KTH pågår ett doktorandprojekt om modeller och metoder för att bedöma långsiktiga investeringar i kraftförsörjningsanläggningen. I första fasen har en simuleringsprogramvara skapats och ett neuralt nätverk tränats med simuleringsresultat för att på ett snabbt sätt kunna bedöma hastigheten som funktion av övrig trafik och elsystemskonfiguration mellan ett par omformarstationer⁵. I andra fasen ska investeringsbeslutstagande undersökas där det neurala nätverket används som bivillkor.⁶

¹ Danielsen, Steinar, 2005.

² Banestrømforsyning, Regler for prosjektering, Jernbaneverket Infrastruktur, 2008.

³ Martinsen, Frank, 2007.

⁴ von Lingen, Jörg, Schmidt, Peter, 1998.

⁵ Abrahamsson, Lars, 2008.

⁶ Abrahamsson, Lars, e-post 091112.

2 Järnvägens kraftförsörjning⁷

2.1 Historik och bakgrund

För 100 år sedan rullade det första elektriska loket på det som idag är Banverkets nät. 1915 började elektriska driften på malmбанan i stor skala och idag uträttas den allra största delen av transportarbetet på järnvägarna i Sverige med elkraft. Sverige, tillsammans med bland annat Schweiz, utmärker sig genom den stora andelen elektrifierade sträckor.

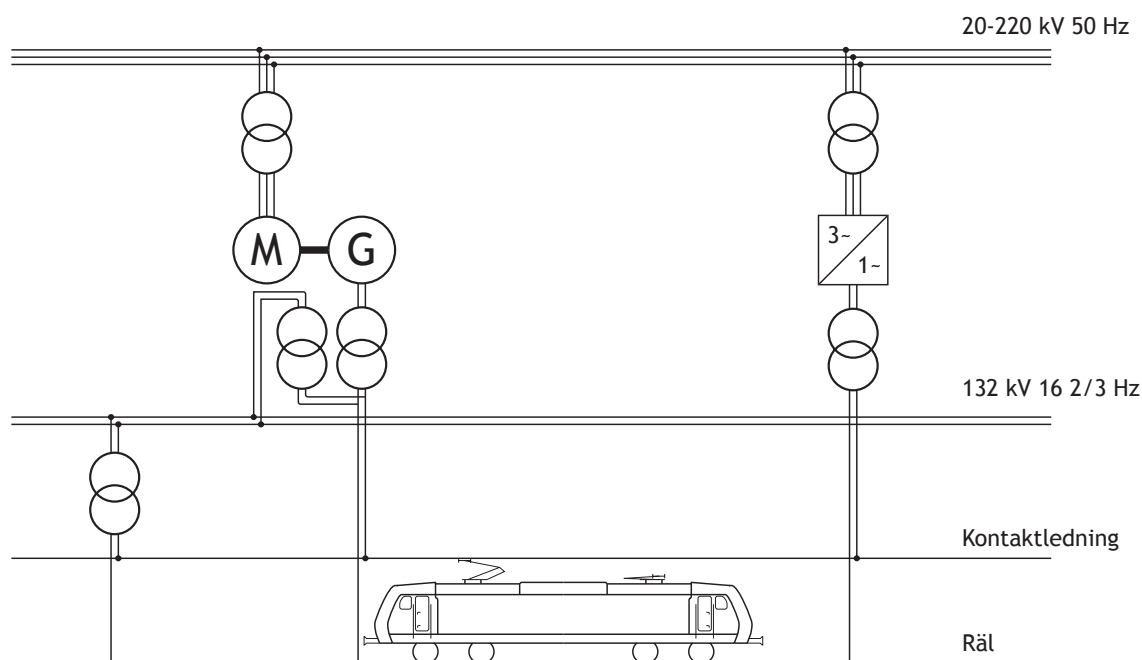
Idag är eldrift det självklara valet för sträckor med tät trafik och höga hastigheter. Eldriften ger även möjlighet att bygga mycket kompakta fordon med hög effekt till skillnad från utrymmeskrävande dieselmotorer. Av historiska skäl finns flera olika strömsystem för järnvägsdrift i världen, de vanligaste är 25 kV 50 Hz, 15 kV 16 2/3 Hz och 3 kV DC.

Det enda tidiga växelströmssystem som kom att överleva i större skala var 15 kV 16 2/3 Hz då det även uppfyller dagens krav på ett banmatningssystem. Spänningen förekommer i Tyskland, Sverige, Schweiz, Österrike och Norge.

Kraftförsörjningssystemets uppgift är att försörja tågen med elektrisk energi. Eftersom nätet täcker ett stort geografiskt område med en väldigt varierande belastning kommer spänningen också att variera kraftigt. Att hålla spänningen lika konstant som i nationella 50 Hz nätet skulle vara förknippat med stora kostnader.

2.2 Nätets uppbyggnad

Industrifrekvensen omformas till 16 2/3 Hz antingen via omformare eller statiska omriktare alternativt genereras i kraftverk med 16 2/3 Hz generatorer, vilket dock inte förekommer i Sverige längre, men väl i Tyskland. Omformarstationerna kan sedan direkt mata kontaktledningen eller mata ett lågfrekvent matarledningsnät. I Sverige är alla omformar- och omriktarstationer direkt anslutna till kontaktledningsnätet men vissa matar också till 132 kV nätet, se Figur 2-1.



Figur 2-1. Översikt 16 2/3 Hz banmatning i Sverige

⁷ Största delen av kapitel 2 är ett reviderat utdrag ur Banmatningssystem för höghastighetsjärnvägar, Niklas Biedermann 2006, kapitel 3. Referenserna härrör också från detta arbete.

I Sverige används ett mittpunktsjordat 132 kV 16 2/3 Hz nät, spänningen till jord är 66 kV. Nätet förbinder en omformarstation och vissa omriktarstationer och matar kontaktledningen via transformatorer. I Tyskland är principen densamma, men spänningen 110/55 kV. Dock har tyska och svenska näten grundläggande skillnader, det svenska 132 kV nätet är synkroniserat med det nationella 50 Hz nätet. Det tyska 110 kV nätet är asynkront med det nationella 50 Hz nätet vilket medför att det är ett helt eget fristående elnät som behöver samma effekt- och frekvensreglering som det nationella 50 Hz nätet också behöver⁸. Vidare finns ingen matningsstation som endast är ansluten till det svenska 132 kV matarlednings-systemet, någon direktgenerering förekommer inte heller⁹. Spänningsomsättningen i transformatorstationerna är fix. Det finns lindningskopplare men dessa styrs manuellt och i normal drift ges spänningen på 16,5 kV sidan endast av spänningen på 132 kV sidan.

2.3 Matningsstationer

2.3.1 Roterade omformare

Roterande omformarna består av en trefasmotor som driver en 16 2/3 Hz enfasgenerator. De roterande omformarna var anledningen till att just frekvensen 16 2/3 Hz slog igenom eftersom det är 1/3 av 50 Hz. Poltalsförhållandet mellan motor och generator blir därmed 3:1, vanligtvis tolvpoliga motorer och fyrapoliga generatorer. Om kontaktledningsnätet är synkront med det nationella elnätet består omformaren av både en synkronmotor och en synkrongenerator. I Tyskland, där nätet är asynkront, är det en tolvpolig släpningad asynkronmotor som driver en fyrapolig synkronmotor.

Roterande omformare förekommer i många olika storlekar och utföranden. Omformarna i Sverige är mobila för att kunna flyttas på järnväg. De minsta aggregaten i Sverige har idag 3,2 MVA, de största 10 MVA kontinuerligt.

De roterande omformarna har vissa fördelar gentemot statiska omriktare: En egenskap är att det matande nätet är helt skilt från kontaktledningsnätet. Detta gör att störningar i princip inte överförs alls. Rotorns stora massa för också med sig att plötsliga variationer i belastningen inte fortplantas till matningen. Nackdelen med rotorns stora rörelseenergi är att omformaren tar några minuter att starta och stoppa. Genom att omformaren drivs av en trefasmotor blir belastningen på trefasnätet helt symmetrisk. Spänningsfall kan kompenseras genom att synkronmotorn producerar reaktiv effekt. Genom att ändra magnetiseringsspänningen kan utspänningen från omformaren hållas konstant.

Roterande omformare har en mycket god överbelastningsförmåga, även under förhållandevis lång tid. Deras driftsäkerhet är mycket hög och fel är ovanliga. Till skillnad från de statiska omriktarna är de också okänsliga för transienter och andra störningar.

Nackdelen är att roterande omformare kräver periodiskt underhåll för vilket de måste stängas av. Verkningsgraden är något sämre än för omriktare, ca 88 % mot 94 %, detta bland annat beroende på att verkningsgraden blir sämre när omformarna inte går på full belastning. Verkningsgraden har dock förbättrats genom att minimera "tomgången". Med hjälp av datorer görs kontinuerligt prognoser som uppskattar hur mycket effekt som behövs och utifrån detta startas respektive stoppas omformare automatiskt. Alla omformare kan i princip återmata energi till trefasnätet.¹⁰

⁸ Steimel, Andreas, 2004, sid. 235.

⁹ Friman, Edward, 2005, sid. 11.

¹⁰ De två föregående styckena baserar på samtal med Greger Jansson, Banverket 2006.

2.3.2 Omriktare

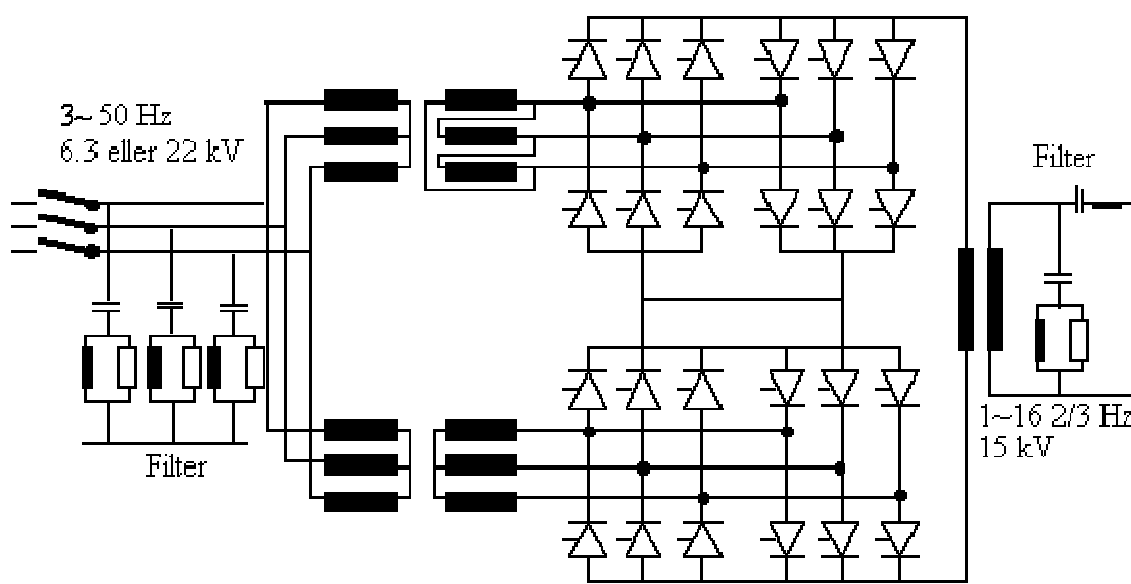
2.3.2.1 Allmänt om omriktare

För att slippa de roterande maskinerna i de roterande omformarna började man redan tidigt leta efter alternativ. Sverige och ASEA var pionjär på omriktartekniken, 1972 togs den första direktomriktaren i drift. Idag har dessa avlösts av de självkommuterade växelriktarna vid nyinstallationer.

Generellt kännetecknas omriktare av en hög verkningsgrad, snabba start- och stopptider och hög tillgänglighet då de inte kräver underhåll på samma sätt som roterande omformare. Till skillnad från roterande omformare som klarar överbelastning med tiotals procent under flera minuter kan statiska omriktare inte överbelastas alls. Därför måste själva omriktaren dimensioneras för den maximala belastningen medan transformatorerna har en stor överbelastningsförmåga och kan dimensioneras för den kontinuerliga belastningen.¹¹

Nedan en kort översikt över omriktarnas kännetecken i banmatningssammanhang, för mer detaljerad information hänvisas till *Elektrisk Traktion* av Stefan Östlund¹² eller litteratur om effektelektronik.

2.3.2.2 Direktomriktare



Figur 2-2. Matningsstation med direktomriktare¹³

Direktomriktarna med ett principschema enligt Figur 2-2, förekommer huvudsakligen i Sverige. De kännetecknas av en enkel uppbyggnad, hög driftsäkerhet och hög verkningsgrad. Med få effekthalvledare förbinder direktomriktare enfasnätet direkt med trefasnätet, några komponenter för energilagring i själva omriktaren som tar upp 33 1/3 Hz effektpulsationerna från enfasnätet förekommer inte.

Nackdelen med direktomriktaren är att övertoner överförs direkt till det andra nätet, för att motverka det används filter. Omriktaren konsumerar även mycket reaktiv effekt, denna måste produceras med filter på primärsidan.

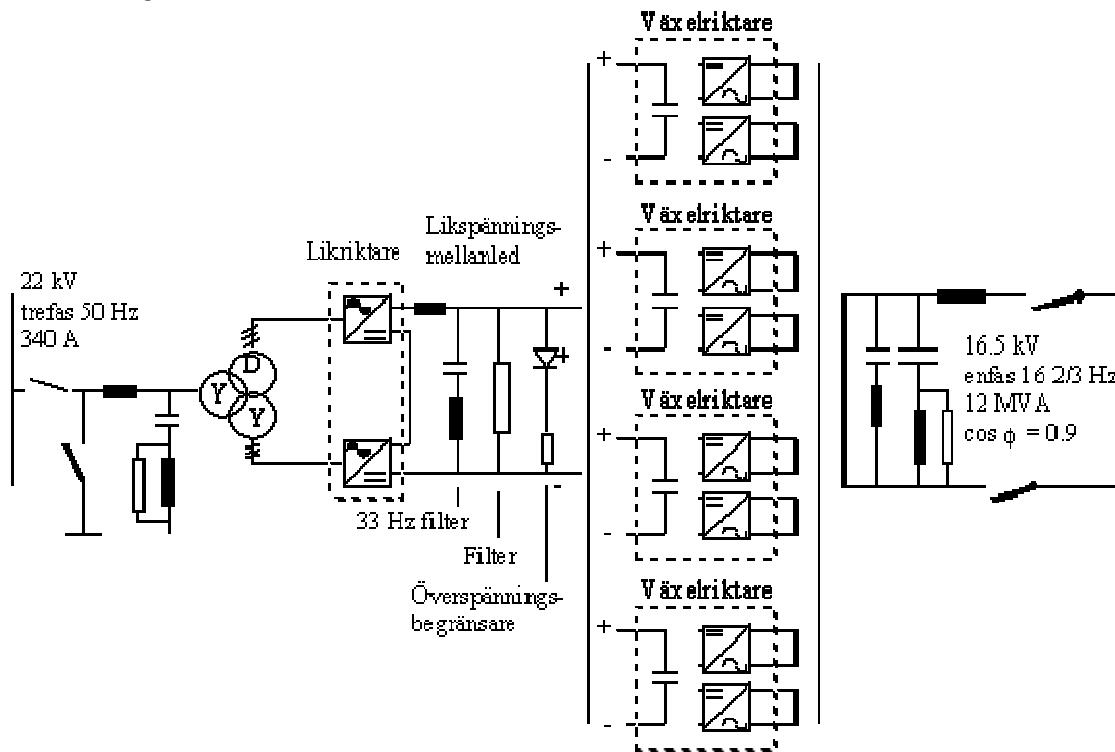
¹¹ Lönard, Detlef m.fl., 1995, sid. 182.

¹² Östlund, Stefan, 2005, sid. 169-171.

¹³ Östlund, Stefan, 2005, sid. 170.

Direktomriktare kräver också ett förhållandevis starkt matande nät. Eftersom det matande nätet deltar i omriktarens kommuteringsförlopp är de endast lämpliga att använda då det nationella 50 Hz nätet är synkront med 16 2/3 Hz nätet.

2.3.2.3 Självkommuterad växelriktare



Figur 2-3. Matningsstation med självkommuterad växelriktare¹⁴

Självkommuterade växelriktaren i Figur 2-3 är i princip samma typ av omriktare som används som traktionsomriktare för drivning av asynkronmotorlok, bara att den omvandlar en lågfrekvent växelspanning till trefas i det fallet. Omriktaren består av en likriktare och en växelriktare, likspänningsmellanledet gör att det inte finns någon synkron koppling mellan primär och sekundärsidan. Av den anledningen kallas växelriktaren också mellanledsomriktare.

Mellanledsomriktaren har en liten reaktiv effektförbrukning och ställer inga speciella krav på det matande nätet med avseende på kortslutningseffekt. Dock är den känslig mot överströmmar.¹⁵ Den självkommuterade växelriktaren kan både generera och konsumera reaktiv effekt.

En utförligare beskrivning av växelriktares egenskaper för banmatning finns i artikeln *Statische Bahnstromumrichter – Systemübersicht ausgeführter Anlagen*¹⁶.

2.4 Kontaktledning och återledning

2.4.1 Översikt

Nätet består som tidigare nämnt av matarledning, samt kontaktledningen, eventuella förstärkningslinor och återledningen. Kontaktledningen kan utföras med olika areor och med eller utan förstärkningsledning beroende på antingen vilka strömmar ledningen måste tåla

¹⁴ Östlund, Stefan, 2005, sid. 171.

¹⁵ Östlund, Stefan, 2005, sid. 171.

¹⁶ Lönard, Detlef m.fl., 1995, sid. 179-190.

eller vilken impedans som krävs för att kunna hålla spänningen. Sättet som återledningen utförs på har stor inverkan på systemets överföringsförmåga. Återledningen är i de vanligare systemen en del av matningen som i sugtransformator- eller autotransformatorsystem, det sistnämnda är det med de lägsta spänningsfallen på grund av den dubbla systemspänningen.

Återledning kan utföras på ett flertal olika sätt och uppbyggnaderna är likadana oberoende av kontaktledningens frekvens och spänning. Likspänningsåterledning är dock annorlunda uppbyggd.

I idealfallet leds strömmen från matningsstationen via kontaktledningen till fordonet och tillbaka via räler eller återledningen. Då dock rälerna ligger på marken kan strömmen i princip ta vilken väg som helst. Detta ger flera problem, det tidigast uppmärksammade problemet var de kraftiga störningar som förorsakades i teleledningarna som gick parallellt med banan.

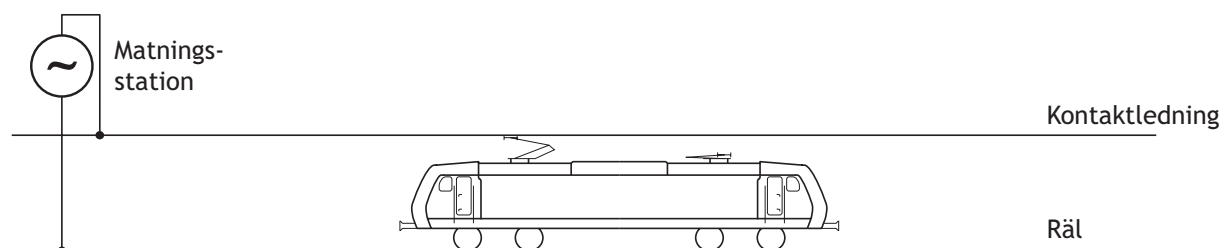
Utförandet av återledningen spelar också en mycket stor roll för kontaktledningsnätets impedans. Lägst impedans har autotransformatorsystemet eftersom systemspänningen dubblas. Därigenom fås ett lägre spänningsfall, längre avstånd mellan matningsstationerna och möjlighet att mata ut högre effekt.

Följande principer för återledning förekommer

- Endast räler
- Räler och separat återledning
- Räler och sugtransformator
- Återledning och sugtransformator
- Autotransformator

I Sverige används huvudsakligen system med antingen sugtransformator eller autotransformator.

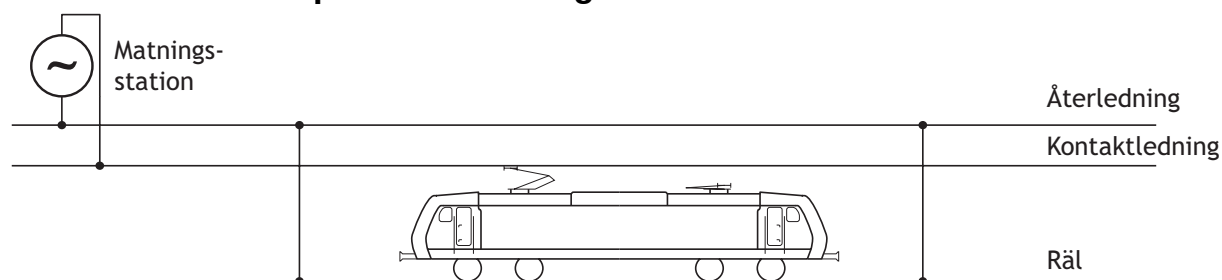
2.4.2 Endast räler



Figur 2-4. Återledning genom rälen

Att endast återleda via räler är det enklaste systemet med de lägsta investeringskostnaderna. Nackdelen är att störningarna på kringliggande utrustning är hög. Detta utförande har även den högsta impedansen och därmed det högsta spänningsfallet.

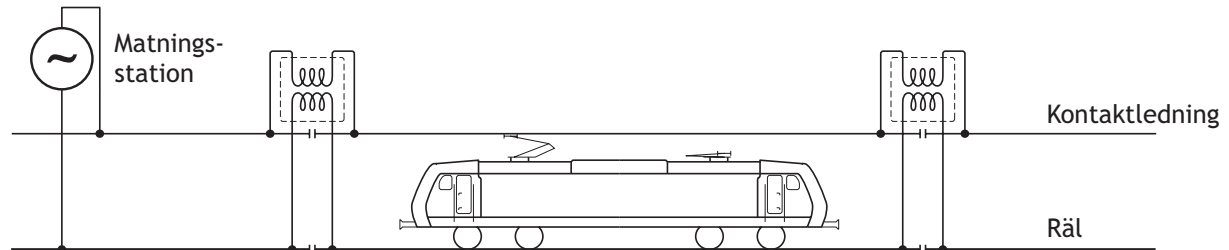
2.4.3 Räler och separat återledning



Figur 2-5. Återledning med separat återledning

Den separata återledningen upphängd i höjd med kontaktledningen i kontaktledningsstolparna minskar impedansen och störningarna avsevärt med en måttlig höjning av investeringskostnaderna. I Tyskland är detta den vanligaste typen av återledning, Sverige förekommer det dock inte på grund av den höga markresistiviteten¹⁷.

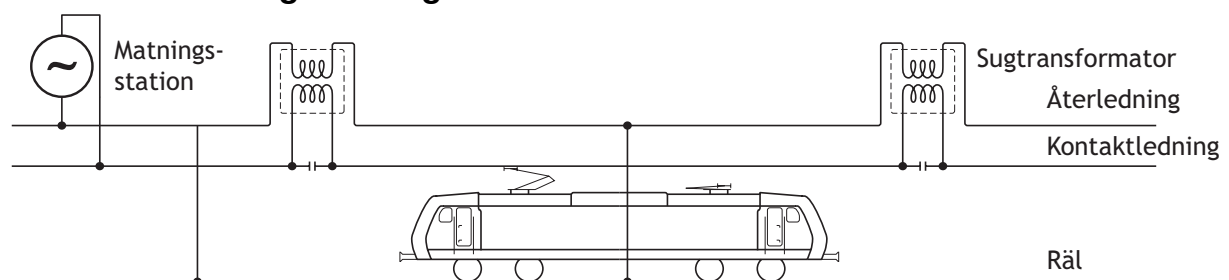
2.4.4 Räler och sugtransformator



Figur 2-6. Återledning med sugtransformator utan separat återledning

Sugtransformator, även benämnd booster transformer (BT) är en strömtransformator med omsättningen 1:1. Primärlindningen är i serie med kontaktledningen och sekundärlindningen i serie med återledaren, i detta fall rälen. Detta tvingar strömmen in i rälen då samma ström måste gå i primär som i sekundärlindningen. Avstånden mellan sugtransformatorerna är ca 3 km.

2.4.5 Återledning och sugtransformator



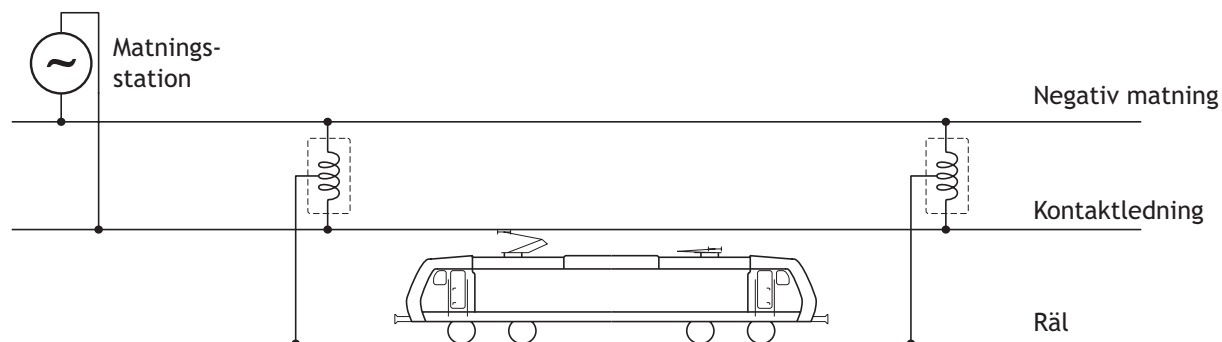
Figur 2-7. Återledning med sugtransformator och separat återledning

För att ytterligare minska störningarna hängs en återledning i kontaktledningsstolparna och returströmmen tvingas in dit. På detta sätt är återledningen huvudsakligen utförd i Sverige. Då separat återledning används är maximala avståndet mellan sugtransformatorerna ca 5,6 km.

Nackdelen med sugtransformatorer är att det behövs ett avbrott i kontaktledningen vid varje sugtransformator. Om en strömavtagare med belastning passerar avbrottet kan det bli en ljusbåge som kan skada kontaktledningen.

¹⁷ Friman, Edward, mfl 2005, sid. 6.

2.4.6 Autotransformator



Figur 2-8. Matning med autotransformator

I ett autotransformatorsystem används en negativ matning utöver kontaktledningen. Den negativa matningen har samma potential som kontaktledningen men ligger i motfas till denna, spänningen mellan kontaktledningen och den negativa matningen är alltså dubbla kontaktledningsspänningen. Spartransformatorerna, autotransformatorerna, är kopplade mellan kontaktledningen och matningen med mittpunkten ansluten till rälen. Eftersom spänningen är den dubbla blir strömmen bara hälften så hög som den skulle vara i ett system utan AT utom mellan de två AT där loket befinner sig.

Det finns inget krav på att matningsstationen måste vara ansluten till kontaktledningen och negativa matningen, matningsstationen kan lika gärna mata ut 15 kV till kontaktledning och räl och den negativa matningen skapas först av autotransformatorerna.

Autotransformatorsystemet ger ett lägre spänningsfall och därmed möjlighet till mycket större avstånd mellan matningsstationerna och högre utmatad effekt. Avståndet mellan två AT är 10-15 km, i Sverige är deras effekt vanligtvis 5 MVA och omsättningen 33/16,5 kV.

AT och BT systemen kan även kombineras till ett AT/BT-system. Avståndet mellan AT ökas till ca 30 km och emellan dem placeras sugtransformatorer. På detta sätt reduceras risken för telestörningar ytterligare. Systemet har både återledare och AT-ledare.¹⁸

2.5 Nätets kapacitet

Det finns flera olika faktorer som påverkar vilken kapacitet kraftförsörjningsanläggningen har.

- Nätets impedans. Ju lägre impedans desto bättre är möjligheten att överföra effekt och därmed att hålla spänningen.
- Tillgång till aktiv effekt. Det innebär att matningsstationerna måste kunna tillhandahålla minst den aktiva effekt som trafiken behöver i varje ögonblick plus förlusterna i överföringssystemet. I banmatningsnätet finns ingen koppling mellan frekvens och tillgång på aktiv effekt, den kopplingen finns hos kraftleverantören som förutsätts ha ett starkt nät.
- Strömtålighet. Kraftförsörjningssystemet måste tåla den högsta förekommande strömmen som kan uppstå i en viss belastningssituation
- Spänningshållning. Kraftförsörjningssystemet måste kunna hålla spänningen inom sådana gränser att tågtrafik med önskad kapacitet är möjlig.

¹⁸ Friman, Edward, mfl, 2005, sid. 7-8.

- Tillgång till reaktiv effekt är nära förknippat med spänningshållningen. Alla omformar- och omriktarstationer kan producera reaktiv effekt men inte transformatorstationerna utan där måste den reaktiva effekten transporteras från närmaste omriktarstation. Förutom en 3,1 MVA synkronkompensator i Lysekil, en ombyggd Q24 omformare, finns ingen extra utrustning för att producera reaktiv effekt såsom t.ex. SVC (static var compensator).

Aktiva effekttillgången är en storhet som är tämligen oberoende av de övriga, dock medför en lägre spänning högre förluster och därmed högre aktiv effektförbrukning i hela systemet. Samtidigt innebär lägre spänning i många fall lägre aktivt effektbehov.

I detta arbete diskuteras endast frågan om spänningshållning.

För att kunna upprätthålla en viss spänning kan ett maximalt antal tåg med viss prestanda tillåtas per tidsenhet dvs. en viss tågtäthet. Tågtätheten ges av tillåtet spänningsfall, maximal ström och maximal utmatad effekt.

3 Krav på spänningen i banmatningsnät

3.1 Inledning

Banmatningsanläggningens syfte är att överföra aktiv effekt till fordonen. För att kunna göra detta så effektivt som möjligt måste dels tillgången på aktiv effekt vara tillräcklig och spänningen måste vara tillräckligt hög för att lokens möjlighet att förbruka aktiv effekt inte ska begränsas.

Då kostnaderna för kraftförsörjningen är en förhållandevis liten del av totala kostnaden för byggandet av en järnvägssträcka, i mycket grova drag 10 %, är det önskvärt att kraftförsörjningen inte begränsar trafiken i någon större grad i den mån det är samhälls-ekonomiskt motiverat.

Detta ställer ett antal olika krav på kraftförsörjningen, dels de viktigaste kraven som järnvägs-trafiken ställer men också formella krav som en sträcka i det Europeiska järnvägsnätet måste leva upp till:

- Operatörers krav
- Tidtabellsläggningens krav
- Normkrav
 - o TSD-normer
 - o Europannormer, EN 50163 och EN 50388
 - o UIC Code 796 O

3.2 Operatörernas krav på spänningen

Operatören bedriver järnvägstrafik och vill köra så kostnadseffektivt som möjligt på järnvägsnätet. När operatören har avtalat med Banverket om att köra en viss trafik förutsätter operatören att den kan köra denna trafik utan att begränsas av till exempel kraftförsörjningen. Vidare förlitar sig operatören på att kraftförsörjningsanläggningen följer normerna och Banverkets standarder. I Järnvägsnätsbeskrivningen¹⁹ och Trafikeringsavtalen mellan Banverket och operatörerna regleras inte detaljer om hur infrastrukturen ska vara beskaffad. Däremot avtalas punktlighetsmål och att tågvikter får vara enligt tilldelad kapacitet (ej enligt linjebok) i exempelvis trafikeringsavtalet mellan Green Cargo och Banverket²⁰.

För operatören är spänningen helt ointressant, endast förseningen är av intresse.

3.3 Tidtabellsplaneringens krav på spänningen

Tidtabellsplaneringen och kapacitetsanalyser förutsätter i regel att spänningen inte utgör någon begränsning.

Vid tidtabellsplanering och kapacitetsanalyser av sträckor används olika program för gångtidsberäkning, dvs. den tid det tar att framföra ett tåg mellan två definierade platser på en given sträcka. Dessa räknar ut hur lång tid sträckan tar att köra med hänsyn till fordons- och tågtyper och banans beskaffenhet (sth²¹, stigningar, kurvor etc.) samt uppehåll, eventuella möten och liknande. Dock förutsätts att elförsörjningen är tillräcklig för att inte begränsa lokens prestanda.²² Simuleringsprogrammen som används vid tidtabellsplaneringen kör enligt lokets dragkraftskurva.

¹⁹ Järnvägsnätsbeskrivning 2009.

²⁰ TRAV GC-BV för T09.

²¹ Sth: största tillåtna hastighet.

²² Ström, Per, 2005.

Tågets teoretiska hastighet reduceras med 3 % för att kompensera för olika förarens körstilar, skillnader mellan fordonsindivider och varierande adhesionsförhållanden²³. Utöver det läggs ett fast tillägg på 4 minuter till för varje 200 km körsträcka för att kompensera för hastighetsnedsättningar och liknande. Vid behov används också ”erfarenhetstillägg” om det är känt att ett tåg behöver längre tid av olika skäl. Av komfortskäl kan tidtabeller för exempelvis nattåg också göras rymligare.²⁴

De maximalt tillåtna vagnvikterna för lok på en viss sträcka begränsas av de dimensionerande stigningarna utmed sträckan där tågets hastighet inte bör sjunka under 40 km/tim eftersom det tar en för stor del av banans kapacitet då. För dubbla lok kan också kraftförsörjningen begränsa vagnvikten. Dessa värden baserar huvudsakligen på erfarenhet och finns inte i någon föreskrift. Lägsta hastigheten som accepteras beror mycket på hur det påverkar trafiken i övrigt. Vid lägre hastigheter får tåget köras som specialtransport.²⁵

3.4 Normkrav på spänningen

3.4.1 TSD-normer

TSD²⁶ Energi (utkast) version 3 090120 behandlar delsystem energi. För spänning och frekvens hänvisar TSD:n till EN 50163 och till EN 50388 för nätets prestanda. Utöver det ska kraftförsörjningen vara så stark att tåg med en maximal effekt av 2 MW inte strömbegränsas enligt EN 50388.²⁷ Vidare finns UIC Code 796 O *Voltage at the pantograph* som beskriver $U_{\text{mean useful}}$. Detta är inarbetat i EN 50388.

3.4.2 Europaanormer

Det är två europaanormer som bestämmer vilka krav som ställs på spänningsnivåerna i järnvägens kraftförsörjning, EN 50163 och EN 50388.

3.4.2.1 EN 50163 Matningsspänningar traktionssystem

EN 50163 definierar minimala och maximala spänningar fordonet ska tåla och under vilka förutsättningar, se Tabell 3-1 för spänningsgränserna.

Tabell 3-1. Spänningsgränser i banmatningssystem

		[V]
Lägsta tillfälliga spänning	$U_{\text{min}2}$	11000
Lägsta kontinuerliga spänning	$U_{\text{min}1}$	12000
Nominell spänning	U_n	15000
Högsta kontinuerliga spänning	$U_{\text{max}1}$	17250
Högsta tillfälliga spänning	$U_{\text{max}2}$	18000

Högsta spänningen vid matningsstationens samlingsskena utan belastning skall vara lika med eller lägre än $U_{\text{max}1}$. Vid normal drift ska spänningarna vara mellan $U_{\text{min}1}$ och $U_{\text{max}1}$. Spänningar mellan $U_{\text{max}1}$ och $U_{\text{max}2}$ får endast förekomma vid återmatande bromsning samt tillfälligt vid ändring av spänningsreglerande utrustning, till exempel lindningskopplare.

$U_{\text{min}2}$ är lägsta spänningen vid vilken fordonet ska fungera och spänningar mellan $U_{\text{min}1}$ och $U_{\text{min}2}$ får inte medföra några skador på materielen.

²³ Lundberg, Åke, 2000, 6.3 Utgångsvärde (för gångtid)

²⁴ Ruge, Armin, 090814.

²⁵ Hela stycket: Wahlberg, Anders, 090817.

²⁶ TSD: Teknisk specifikation för driftskompatibilitet

²⁷ Interoperability unit, Trans-European conventional rail system, subsystem Energy. (IU-ENE-090120-TSI 3.0), sid. 15, avsnitt 4.2.4.

Spänningar mellan $U_{\min1}$ och $U_{\min2}$ får förekomma maximalt 2 minuter sammanhängande och spänningar mellan $U_{\max1}$ och $U_{\max2}$ får förekomma maximalt 5 minuter sammanhängande. Därefter ska de följas av en period av en spänning mellan $U_{\min1}$ och $U_{\max1}$.

Till skillnad från i normen tillåtna $U_{\max1} = 17,25$ kV gäller hos Banverket $U_{\max1} = 16,5$ kV på grund av att Rc-lok inte tål högre spänning.

3.4.2.2 EN 50388 Samordning mellan kraftmatning och fordon

EN 50388 använder EN 50163 som underlag och ställer upp villkor för samverkan mellan fordonet och banmatningssystemet, bland annat ställs villkor för maximal traktionsström som funktion av kontaktledningsspänningen och villkor för spänningens kvalitet i form av $U_{\text{mean useful}}$.

$U_{\text{mean useful}}$

$U_{\text{mean useful}}$ är ett kvalitetsindex för kraftförsörjningen. Det avser ett genomsnitt av spänningen under en viss ospecificerad tidsperiod. Måttet beräknas genom simuleringar eller mätningar. Det är ett lägsta krav och ska ge en indikation om godtagbar spänningshållning. Det finns två varianter:

$U_{\text{mean useful}}$ (zone) avser spänningen för samtliga tåg i ett visst geografiskt område under perioden med högst belastning. Det görs ingen skillnad om tågen står still eller kör. I praktiken är det ett lägre krav än $U_{\text{mean useful}}$ (train) då det är genomsnittet av spänningen för alla tåg.

$U_{\text{mean useful}}$ (train) är spänningen för ett tåg i ett geografiskt område och endast när tåget konsumerar traktionseffekt, inte när tåget står stilla eller bromsar med återmatande broms. Tåget med lägst $U_{\text{mean useful}}$ (train) blir det dimensionerande tåget.

$U_{\text{mean useful}}$ ska vara lägst 13,5 kV vid strömavtagaren för konventionella banor samt att spänningens momentanvärde aldrig ska underskrida $U_{\min1}$.

Tanken är att $U_{\text{mean useful}}$ (zone) ska identifiera ett område med dålig spänning men i normen finns inga krav på områdets storlek. Väljs området stort blir det ett lägre krav än $U_{\text{mean useful}}$ (train), väljs området mycket litet kan man identifiera en dålig spänning som inte påverkar trafiken. I en artikel²⁸ har $U_{\text{mean useful}}$ beskrivits mer ingående än i normerna men kriteriets fördelar har inte underbyggts med simuleringar eller ifrågasatts. I en annan artikel²⁹ visas hur $U_{\text{mean useful}}$ simulerades och uppmättes för en nybyggd sträcka och det konstaterades att värdet uppnås med god marginal och att sträckan därmed uppfyller normkraven i det avseendet.

I EN 50388 ges också en matematisk beskrivning av $U_{\text{mean useful}}$ på två olika sätt.³⁰

$$U_{\text{meanuseful}} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{T_i} \int_0^{T_i} U_{pi} \cdot |I_{pi}| dt}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{T_i} \int_0^{T_i} |I_{pi}| dt}$$

n	Antalet tåg
U_{pi}	Grundtonens effektivvärde för spänningen vid tåg i:s strömavtagare
T_i	Mätningens tid, tåg i

²⁸ Hofmann, Gerhard, 2004.

²⁹ Aeberhard, Martin, mfl, 2007.

³⁰ EN 50388:2005 Annex B.

$|I_{pi}|$ Beloppet av grundtonens effektivvärde för strömmen genom tåg i:s strömavtagare. Anmärkning: Detta är inte är traktionsströmmen.

Eftersom varken uppmätta eller simulerade storheter är tidskontinuerliga utan diskreta kan ett ekvivalent resultat fås med

$$U_{meanuseful} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{M \cdot N \cdot \Delta t} \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^M U_{j,k}(t) \cdot \Delta t$$

För varje tåg är därmed

N Antalet beräkningar under simulationen

M Antalet beräkningssteg i varje summa

Δt simuleringsstegens längd

Dessa formler används för $U_{mean\ useful}$ (zone). När $U_{mean\ useful}$ (train) ska beräknas sätts $n=1$ och endast perioderna då tåget tar upp traktionseffekt beaktas.

Anledningen till att dessa båda ekvationer förekommer är främst för att man vid framtagandet av den europeiska standarden inte kunde enas om vilken som skulle användas då olika länder favoriserade ”sin” variant.³¹

Egna kommentarer till den matematiska beskrivningen i EN 50388: I normalfall kan både uppmätta och simulerade värden för spänning och ström inte beskrivas som (kontinuerliga) matematiska funktioner utan de kommer att vara ett antal sampel med jämna tidssteg emellan. Därför kommer beräkningen av $U_{mean\ useful}$ för ett tåg alltid att vara medelvärde av spänningssamplena under vilka tåget förbrukar traktionseffekt

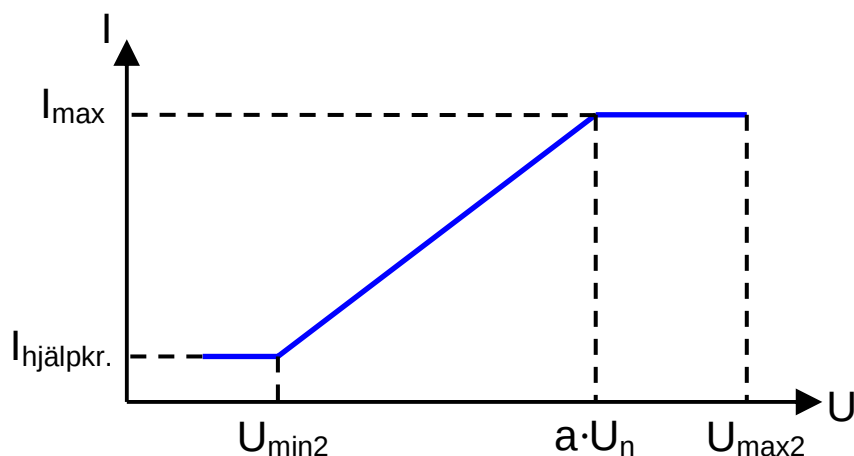
$$U_{meanuseful} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N U_k$$

där N är antalet sampel och U_k spänningen i sampel k .

³¹ Meyer, Markus, 091119.

Strömbegränsning

I EN 50388 ställs också krav på att moderna fordon ska begränsa traktionsströmmen (med detta avses strömmen vid strömvatagaren, inte vid motorerna) vid sjunkande spänning³².



Figur 3-1. Strömbegränsning enligt EN 50388

Under $U_{\min2}$ är dragkraften helt nedstörd och strömmen härrör endast från behovet av hjälpkraft. Från $U_{\min2}$ till $a \cdot U_n$ stiger strömmen linjärt för att från $a \cdot U_n$ vara obegränsad, se Figur 3-1. För $U_n = 15$ kV är $a = 0,95$. Det innebär att strömmen ökar linjärt från 0 till 1 p.u. i intervallet 11 kV till 14,25 kV. I Tabell 3-2 visas vilka värden det ger vid de olika spänningsgränserna. Som jämförelse är också motsvarande gränser vid 25 kV angivna, där träder strömbegränsningen i kraft vid $0,9 \cdot U_n$.

Tabell 3-2. Effekt och ström vid strömbegränsning

U	U [kV]	U^{33} [p.u.]	Traktionsström I [p.u.]	Traktionseffekt [p.u.]	$U_{25 \text{ kV}}$ [kV]
U_{nom}	15				25
$U_{\min2}$	11	0,77	0	0	17,5
$U_{\min1}$	12	0,84	0,308	0,26	19,0
$U_{\text{mean useful}}^{34}$	13,5	0,95	0,77	0,73	22,0
$0,90 \cdot U_n$	13,5	0,95	0,77	0,73	22,5
$0,95 \cdot U_n$	14,25	1	1	1	23,75

Begränsningen utgår från maximala effekten som ges av den högsta möjliga motorströmmen³⁵.

³² EN 50388:2005 § 7.2.

³³ Basspänning 14,25 kV där loket inte strömbegränsas.

³⁴ På konventionella sträckor

³⁵ Markus Meyer, epost 091202.

4 Simulering med Tracfeed

4.1 Simulering och dimensionering hos Banverket

Banverket har hittills inte gjort fullständiga simuleringar av kraftförsörjningen i stora geografiska områden med avseende på både spänningen och effekten i en och samma simulering utan de kraftförsörjningsutredningar som gjorts analyserar huvudsakligen tillgången på aktiv effekt samt spänningshållningen var för sig. Som stöd har beräkningar och simuleringar används, de senare dock i första hand med avseende på effektbehov. Även analyser av nätets överföringsförmåga, dvs. spänningshållning har gjorts men utan systematiska analyser vad den resulterande spänningen har för effekter på tågföringen³⁶. Vid nybyggnationer har det aktiva effektbehovet beräknats utifrån simuleringar med en antagen trafikering och därur har banmatningssystemet dimensionerats.

Åtgärderna har både bestått av att öka den tillhandahållna effekten, dvs. förstärka matningsstationerna, öka överföringsförmågan genom att bygga om för högre strömmar, samt ombyggnader för att förbättra spänningshållningen. I dagens nät är problemet i första hand att kunna tillhandahålla en god spänning, effekten finns i regel tillgänglig utom i vissa områden. Dessutom är det enklare att fastställa när effektbehovet överstiger kapaciteten och därefter förstärka systemet.

Avsikten är att göra omfattande simuleringar av nätet med Tracfeed för att bättre kunna se hur trafiken påverkar nätet och hur man bäst kan förändra nätet för att det ska uppfylla järnvägens krav. Detta förutsätter dock att det finns klart definierade och praktiskt användbara kriterier för att utvärdera simuleringarna.

4.2 Tracfeed/Simpow

Tracfeed är ett program för simulering av järnvägens kraftförsörjning. Det marknadsförs av Balfour Beatty och använder Simpow för beräkningarna. Simpow är ett allmänt simuleringsprogram för kraftsystem och är utvecklat av ABB och marknadsförs numera av STRI.

4.2.1 Lokens prestanda i Tracfeed

Lokets dragkraftskurvor har tillhandahållits av Banverket. De kommer från olika källor och används delvis också i andra sammanhang inom Banverket, t.ex. tidtabellssimulering. Där är dock bara dragkraftskurvan vid 15 kV av intresse.

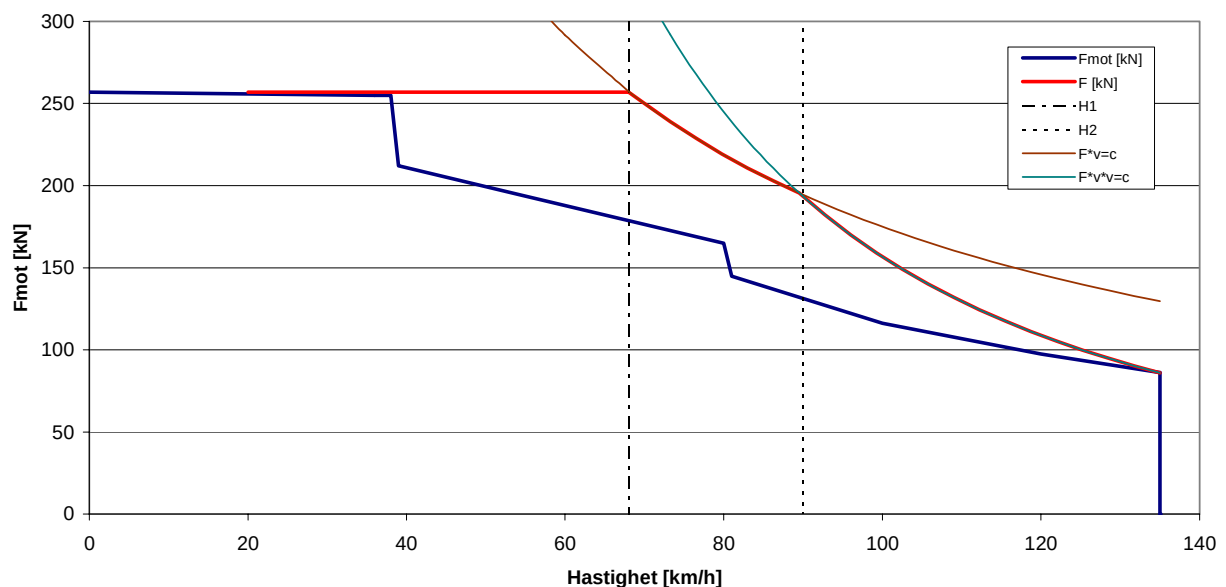
Tracfeed beskrivs i manualerna³⁷. Det finns tre lokmodeller, växelströmslok med asynkronmotor (*Induction machine AC train*), likströmslok med asynkronmotor (*Induction machine DC train*) samt växelströmslok med likströmsmotor (*DC machine AC train*). I simuleringarna används *Induction machine AC train* för alla asynkronlok samt lok med uppsides- eller nedsidesreglering via lindningskopplare, kontaktorer etc. oberoende om loken likriktar motorströmmen eller ej. *DC machine AC train* är endast avsedd för lok med styrda tyristorlikriktare och används för Rc m.fl. loktyper.

För loken anges sedan ett antal egenskaper som Tracfeed använder för beräkningarna. Dock behövs inga uppgifter om kretslösningar. För tyristorlok anges också antalet bryggor för beräkningen av reaktiva effektförbrukningen.

³⁶ Eriksson, Anders, mfl, 2009.

³⁷ Tracfeed Simulation Reference manual (090612, revision L, J Stern), Tracfeed Simulation Users manual, Swedish edition (090618, revision L, J Stern)

Utgående från indata räknar Tracfeed ut dragkraften i varje punkt. Dragkraftskurvan är sammansatt av tre olika delar, se Figur 4-1. I första delen är dragkraften F konstant, därefter är $F \cdot v$ konstant (flöde eller ström avtar med hastigheten) och sedan ett intervall där $F \cdot v \cdot v$ är konstant (flöde och ström avtar med hastigheten). Den första brytpunkten är bashastigheten och anges med konstanten $Trainlimit1$ [kN·km/h] vilken är en "effekt" och anges som produkten av dragkraften och hastigheten vid basvarvtalet. Nästa punkt som anges är $Trainlimit2$ [kN] vilket är lokets dragkraft vid maximala hastigheten. Den bestämmer läget för kurvan $F \cdot v \cdot v$ vilken kommer att skära kurvan $F \cdot v$.



Figur 4-1. Konstruktion av dragkraftskurvan i Tracfeed

Resultaterande dragkraftskurva är ritad med rött i diagrammet. Utöver det finns möjlighet att ange fasta begränsningar i form av en lista med dragkraft och hastighet. Tracfeed kommer att interpolera linjärt mellan brytpunkterna. Tabell 4-1 är ett utdrag ur listan för det ovan avbildade exemplet.

Tabell 4-1. Dragkraftssteg i Tracfeed

v [km/h]		[F]
38,00	$FMOT$	255
39,00	$FMOT$	212
54,00	$FMOT$	194,8
80,00	$FMOT$	165

Dragkraftskurvan som används är den lägsta av dessa tre alternativ, i detta fall alltså den blå.

4.2.1.1 Dragkraft vid avvikande spänning

Vid sjunkande spänning är det flera faktorer som begränsar prestandan:

Tabellen $FUsupplyLIM$ i lokmodellen i Tracfeed anger lokets maximala dragkraft som funktion av spänningen och tabellen $PUsupplyLIM$ anger lokets maximala effekt som funktion av spänningen

Med hjälp av $Trainlimit1$ och $Trainlimit2$ beräknas dragkraften enligt följande för ett asynkronlok och därmed också lindningskopplarlok:

F är aktuell dragkraft, v är hastigheten, U är verklig spänning och U_{nom} är nominell spänning.

För spänningar under U_{nom}

$$F = \frac{Trainlimit1}{v} \cdot \frac{U}{U_{nom}}$$

$$F = Trainlimit2 \left(\frac{v_{max}}{v} \right)^2 \cdot \frac{U}{U_{nom}}$$

För spänningar över U_{nom}

$$F = \frac{Trainlimit1}{v}$$

$$F = Trainlimit2 \left(\frac{v_{max}}{v} \right)^2$$

För spänningar under U_{nom} reduceras alltså dragkraften i med förhållandet mellan U och U_{nom} medan den för spänningar över U_{nom} inte påverkas. Hastigheten upp till vilken konstant dragkraft fås kommer att minska.

Ovanstående innebär också att U_{nom} , i Tracfeed kallat *nominal voltage at the pantograph*, definierar den lägsta spänningen vid vilket loket lämnar full prestanda. Det är något missvisande att kalla denna för U_{nom} då denna spänning knappast sammanfaller med kraftförsörjningsanläggningens nominella spänning som är 15 kV.

För lok med likströmsmotorer skiljer sig Tracfeeds modell med avseende på den spänningsberoende dragkraftskurvan på en avgörande punkt eftersom samma ekvationer används vare sig spänningen är över eller under U_{nom} . Genom *UMOTMAX* anges sedan den högsta tillåtna motorspänningen. Värdet anges i procent av motorspänningen vid U_{nom} . För samtliga lokmodeller Banverket använder är denna 100 %, dvs. en spänning över U_{nom} kan inte bidra till att öka lokets prestanda.

För alla spänningar ges därmed dragkraften av

$$F = \frac{Trainlimit1}{v} \cdot \frac{U}{U_{nom}}$$

$$F = Trainlimit2 \left(\frac{v_{max}}{v} \right)^2 \cdot \frac{U}{U_{nom}}$$

Lokets effekt kommer att öka med ökande spänning tills *UMOTMAX*, *PUsupplyLIM* eller *FUsupplyLIM* begränsar effekt eller dragkraft.

4.3 Simuleringarna i detta arbete

Simuleringarna har utförts i Tracfeed/SIMPOW. Indata har tillhandahållits av Banverket och har bestått av modeller av banan och loken, dels elektrisk information om nätet, geometrisk och annan information om banan samt elektriska modeller av loken. Modellerna har använts som de är och inte verifierats. Detta ligger utanför arbetets område. Däremot kommenteras det delvis hur en felaktig modell kan tänkas påverka resultatet. I grunden gör en felaktig modell mera vid dimensioneringen av kraftförsörjningssystemet än vid framtagande av kriterier. Kriterierna jämför huvudsakligen vad som händer vid ideal spänning och vid verklig spänning. Eftersom modellerna är samma i båda fall kommer också påverkan av ett fel att vara likadant och felen således ta ut sig, såtillvida det inte handlar om stora grundläggande fel. Resultaten är dock givetvis rimlighetsbedömda.

I Tracfeed kan bara tåg anges, ett tåg består därmed av lokets egenskaper samt alla vagnars egenskaper. I dagsläget är hela järnvägsnätet uppbyggt som modell från cirka Mälardalen och norrut, för övriga Sverige finns all data tillgänglig men den är inte anpassad för användning i Tracfeed än.

I samtliga fall är adhesionen så hög att den aldrig är en begränsande faktor. Däremot är en accelerationsbegränsning inlagd för att hålla accelerationen på rimliga nivåer, oftast maximalt $0,50 \text{ m/s}^2$. När tåg jämförs är givetvis förutsättningarna identiska.

5 Fordon

5.1 Fordonstyper

För att kunna diskutera kriterier för utvärdering av spänningsnivåer måste man undersöka hur fordonen beter sig beroende av spänningen. I följande framställning används "lok" synonymt för dragfordon, vare sig det är lok eller motorvagnar. I arbetet har dock framförallt lokdragna tåg studerats då tågvikten med samma dragfordon kan förändras.

Spänningen har en stor inverkan på fordonens prestanda och olika kategorier av fordon kommer att påverkas olika av en lägre spänning. Loken kan indelas i tre kategorier med avseende på deras elektriska egenskaper:

- Lok med lindningskopplare eller kontaktorer
- Tyristorlok
- Asynkronlok

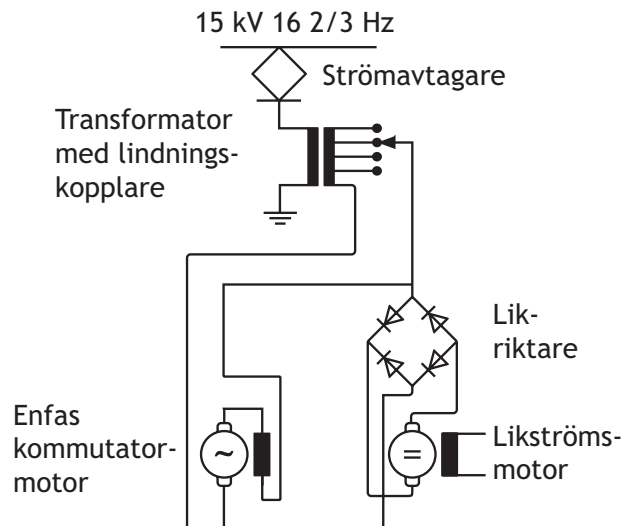
Utöver dessa tre varianter finns också olika specialfall, till exempel lok med synkronmotorer, dock inte i Sverige annat än på experimentstadiet. Det som antagligen kommer komma mer är permanentmagnetiserade synkronmotorer men ur kraftförsörjningssystemets perspektiv blir de sannolikt identiska med asynkronloket, dvs. de har ingen reaktiv effektförbrukning och en sinusformad ström.

Efter en kortfattad genomgång av de olika loktypernas funktion diskuteras hur deras prestanda påverkas av varierande spänning.

5.2 Kontaktor- eller lindningskopplarlok

Den äldsta, mer allmänt spridda, varianten av växelströmslok består av en transformator och på dess sekundärsida kontaktorer som förbinder motorn med olika lindningar. Motorn är då en, vanligtvis seriemagnetiserad, enfas kommutatormotor. Till uppbyggnaden är motorn i princip en likströmsmotor, därav var man också tvungen att välja den låga frekvensen. Vidare utvecklingssteg av loket är att kontaktorer har ersatts av en kompaktare lindningskopplare på antingen transformatorns sekundär- eller primärsida. På vissa lok, t.ex. El 15 likriktas spänningen innan motorn som då är en separatmagnetiserad likströmsmotor. Detta är ett utvecklingssteg på väg till tyristorloket

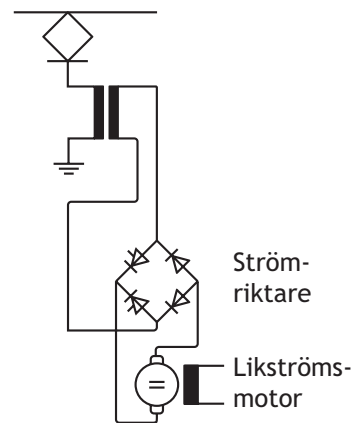
där likriktaren ersatts av en strömriktare. Det finns också mellanvarianter där tyristorer används för att lindningskopplaren alltid ska koppla i strömlöst tillstånd och på så sätt kan dimensioneras mindre och slitaget minskar avsevärt. Denna typ har dock inte förekommit i Sverige. Figur 5-1 visar både varianten med växelströms- och likströmsmotorn, som dock givetvis inte förekommer samtidigt som det är ritat i figuren.



Figur 5-1. Kretsschema kontaktor- och lindningskopplarlok

5.3 Tyristorlok

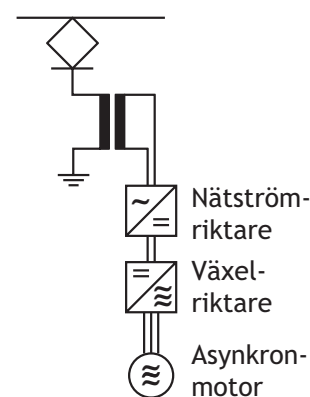
I tyristorloket matas motorn av en strömriktare som i regel består av två halvstyrda bryggor i serie på transformatorns sekundärsida. På det sättet får motorerna en steglöst reglerbar likspänning. Motorerna är separatmagnetiserade likströmsmotorer. Figur 5-2 visar en schematisk ritning med en halvstyrd brygga. Lokens nackdel är att bryggorna har en stor reaktiv effektförbrukning som är som högst när bryggorna endast är lite utstyrda. Av den anledningen seriekopplas två bryggor eftersom ”halvt pådrag” då motsvarar en helt utstyrd brygga och en helt nedstyrd vilket ger lägre reaktiv effektförbrukning än med en brygga som bara vore till hälften utstyrd.



Figur 5-2. Kretsschema tyristorlok

5.4 Asynkronlok

Moderna lok utförs i regel som lok med trefas asynkronmotorer. Drivutrustningen består av en likriktare, nätströmriktare, och en växelriktare som producerar trefas med önskad spänning och frekvens, se Figur 5-3. Drivsystemet har många fördelar, sett ur banmatningens perspektiv är det att loket kan köras med valfri fasvinkel, både resistivt, induktivt eller kapacitivt beroende på vad som behövs för tillfället. Vidare kan ett sådant lok dra en sinusformad ström.



Figur 5-3. Kretsschema asynkronlok

5.5 Traktionsmotor

5.5.1 Egenskaper av en traktionsmotor

För en motor är strömmen proportionell mot vridmomentet. Maximal effekt tas ut från basvarvtalet, dvs. punkten där strömmen är maximal. Därefter är effekten konstant, spänningen fortsätter öka samtidigt som strömmen minskar. Därmed ökar varvtalet men vridmomentet avtar.

För konstruktionen av ett lok innebär det att dragkraften ges genom det tyngsta tåg med vilket man vill kunna starta i en viss stigning. Effekten ges av hur mycket man vill kunna accelerera i höga hastigheter eller på vilken tid man vill köra en viss sträcka.

5.5.2 Asynkronmotor³⁸

Asynkronmotorn är den helt dominerande traktionsmotorn idag. Den arbetar med fullt flöde Φ upp till basvarvtalet.

$$\Phi = k \frac{U}{f}$$

För att hålla flödet konstant vid ökande motorvarvtal måste spänningen U variera linjärt med frekvensen f , k är en konstant. Vid basvarvtalet lämnar växelriktaren sin maximala spänning. Upp till basvarvtalet är vridmomentet konstant och begränsas av den maximala ström växelriktaren kan lämna respektive motorn tål.

Över basvarvtalet ökas varvtalet genom att frekvensen ökas och spänningen hålls konstant, därigenom minskar flödet och motorn arbetar med fältförsvaging. I början avtar momentet

³⁸ Östlund, Stefan, 2005, sid. 68

ungefär som flödet, dvs. $1/f$, kippmomentet avtar som $1/f^2$. För att ha tillräcklig marginal mellan kippmomentet och det uttagbara momentet måste dragkraften från ett visst varvtal minskas som kippmomentet och därmed minskar dragkraften F också som $1/f^2$. Effekten avtar då som $1/f$. Varvtalet är direkt proportionellt mot frekvensen.

5.5.3 Likströmsmotor³⁹

Den separatmagnetiserade likströmsmotorn används i alla tyristor- och likriktarlok. Motorn startas med fullt flöde (full magnetiseringsström) och spänningen över ankarlindningen ökas för att öka varvtalet. Maximal ankarspänning ger basvarvtalet och ankarspänningen är direkt proportionell mot varvtalet. Därefter minskas flödet, dvs. strömmen i fältlindningen. Då minskar motorns moment och varvtalet ökar, samtidigt som ankarströmmen och spänningen förblir konstanta. Vridmomentet minskar först som $1/v$ och därefter som $1/v^2$ eftersom ankarströmmen måste minskas vid höga hastigheter för att kommuteringen ska fungera väl⁴⁰.

5.6 Spänningens prestandapåverkan

5.6.1 Spänningens påverkan på dragkraft och effekt

För att utvärdera spänningsnivåer är det viktigt att åskådliggöra hur dragfordonens prestanda påverkas av spänningen. För låg spänning medför att det inte längre går att överföra tillräckligt mycket aktiv effekt. Det får till följd att den maximalt uttagbara effekten för ett tåg sjunker. Om tåget behöver en effekt som överstiger den maximalt uttagbara effekten kommer det att försenas. Effekten beror på önskad dragkraft och hastighet.

Ett loks dragkraft begränsas av adhesionen samt av motorströmmen upp till basvarvtalet, därefter begränsar motorns effekt och dragkraften sjunker. Upp till bashastigheten är dragkraften konstant, därefter minskar dragkraften F samtidigt som hastigheten v ökar och effekten P är konstant, $P=F \cdot v$.

Sjunker spänningen har äldre lok ofta ingen särskild begränsning medan moderna asynkronlok ofta har en begränsning av lokströmmen eller effekten. Det finns framförallt två sätt att åskådliggöra detta, dragkraften som funktion av spänningen och effekten som funktion av spänningen. De förstnämnda säger mer om hur lokens prestanda påverkas, de sistnämnda visar på ett annat sätt hur den aktiva effektbegränsningen påverkar effekten.

5.6.2 Dragkraftskurvor som funktion av spänningen⁴¹

5.6.2.1 Loks dragkraft

Nedan visas dragkraftskurvor vid olika spänningar för de lokmodeller som används i detta arbete. Dragkraftskurvorna är beräknade genom simulering och visar därmed hur lokets prestanda är i de senare gjorda simuleringarna. Modellerna härstammar dock från många olika källor, dragkraftskurvorna kan vara från när loket byggdes, de kan vara beräknade vid senare ombyggnader eller eventuellt också framtagna genom mätningar. Genom till exempel omlindningar av motorer kan isoleringens temperaturtålighet ha förbättrats vilket ökar möjligheten till överström under en viss tid men eventuellt har aldrig dragkraftskurvan anpassats efter detta. Dragkraftskurvan visar ofta en högre effekt än lokets timeffekt då dragkraftskurvan visar den kortvariga effekten. Ofta kan det skilja mer än en faktor 2 mellan timeffekten och den högsta effekten. Vidare tar de ingen hänsyn till adhesionen. De flesta av

³⁹ Östlund, Stefan, 2005, sid. 75

⁴⁰ Östlund, Stefan, 2005, sid. 76

⁴¹ Se appendix för beskrivning hur kurvorna är beräknade.

dragkraftkurvorna som Banverket använder i Tracfeed förutsätter ett adhesionsutnyttjande kring 35 %. Exempelvis förutsätter Rc4-lokets dragkraftskurva ca 33 % adhesionsutnyttjande och Iore-lokets ca 39 %⁴². I verkligheten är det ett högt värde som kräver mycket bra adhesionsförhållanden för att kraften ska kunna överföras från loket till spåret.

Samma dragkraft används också vid tidtabellsplanering, där är den dock inte spänningsberoende. Det är alltså mycket svårt att kunna visa med vilken noggrannhet de överensstämmer med verkligheten. För att verifiera kurvornas korrekthet skulle man antagligen vara tvungen att genomföra mätningar med loket i testbänk eller på speciella provsträckor. Så länge man bara undersöker principiella samband spelar kurvornas absoluta värden ingen roll då de oberoende av detta visar spänningens prestandapåverkan. Så länge man i en utvärdering simulerar störd drift med ostörd drift som referens minskar man också påverkan av eventuella felaktigheter eftersom man jämför samma matematiska lokmodell.

För dragkraftkurvorna har återigen 4 karakteristiska lok valts; Br 185 som det moderna asynkronloket med effektbegränsning enligt EN 50388, El15 som lindningskopplarloket utan någon speciell begränsning samt två varianter av Rc-loken eftersom de är de vanligaste loken i Sverige.

För samtliga lok förändras dragkraftskurvan inte över 15 kV. En dragkraftskurva som slutar innan lokets sth har uppnåtts innebär att loket inte kom upp i hastigheten inom simuleringstiden.

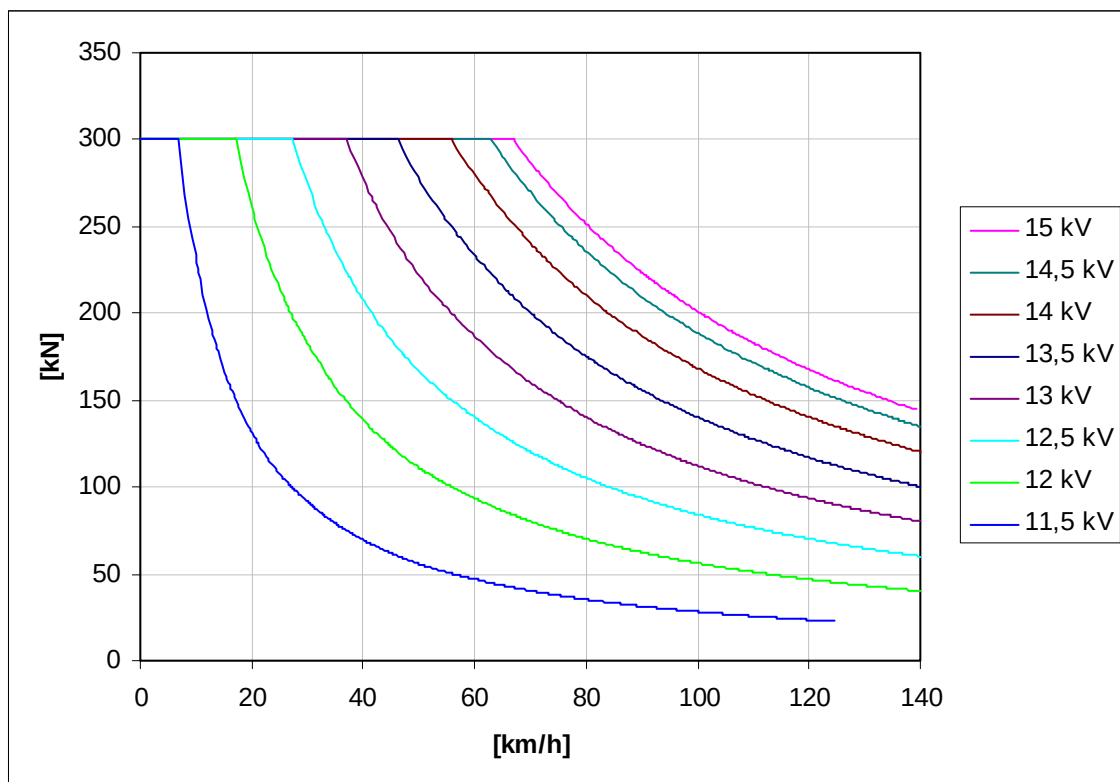
5.6.2.2 Traktionsströms-/effektbegränsning

Ett modernt asynkronlok har en effekt som i princip är oberoende av spänningen (inom ett visst område) och en eventuell ström- eller effektbegränsning beror huvudsakligen på hur strömriktaren styrs. Moderna lok ska följa strömbegränsningen enligt EN 50388 men då föreskriften är relativt ny följer inte strömbegränsningen standarden utan ofta tillåts en högre ström vilket innebär att strömbegränsningskurvan kan skilja avsevärt mellan olika fordonstyper.

Strömbegränsningen medför en effektbegränsning men eftersom loket först utvecklar full effekt vid bashastigheten kommer full dragkraft alltid att stå till förfogande upp till en viss hastighet som sätts av strömbegränsningen. Om dragkraften var tillräcklig vid nominell spänning kommer den också att vara tillräcklig för att köra hela sträckan vid lägre spänning men hastigheten kan bli lägre och således tiden längre. Accelerationen kommer att begränsas.

I denna kategori återfinns i princip alla fordon med asynkronmotordrivsystem i Sverige, dvs. alla fordon nylevererade från mitten av 1990-talet. I dagsläget är det ungefär 90 lok och 370 motorvagnar inklusive fordonsserier under leverans. Många motorvagnar motsvarar storleks- och effektmässigt 2-3 motorvagnar av äldre modell. Då både loken och motorvagnarna används i gränsöverskridande trafik och delvis samägs med utländska bolag blir siffran mycket ungefärlig.

⁴² Deutschmann, Peter, Fordonsdatabas-v6 090731.



Figur 5-4. Dragkraftskurva Bombardier TRAXX F140AC

I Figur 5-4 visas dragkraftskurvan för Bombardier TRAXX F140 AC/MS (AC: växelström, MS: multisystem). Loket används i Sverige hos flertalet järnvägsföretag med olika littera: DB/Railion Br 185, Hector Rail 241 och GC Re. Alla lok har dock i princip identiska egenskaper. Denna dragkraftskurva motsvaras av en konstant ström upp till en maximal effekt och sedan en konstant effekt. Vid sjunkande spänning begränsar loket endast effekten vilket sker aktivt.

Eftersom dragkraften i ett asynkronlok huvudsakligen styrs av växelriktarens prestanda och programvaran som styr den, dvs. spänning, ström och frekvens, är denna kurva minst beroende av olika förutsättningar. För ett lok som följer effektbegränsningen enligt EN 50388 borde kurvan inte längre förändras vid spänningar över 14,25 kV. Just BR185.2 har dock en dragkraftskurva som i Figur 5-4.⁴³

5.6.2.3 Ingen aktiv begränsning

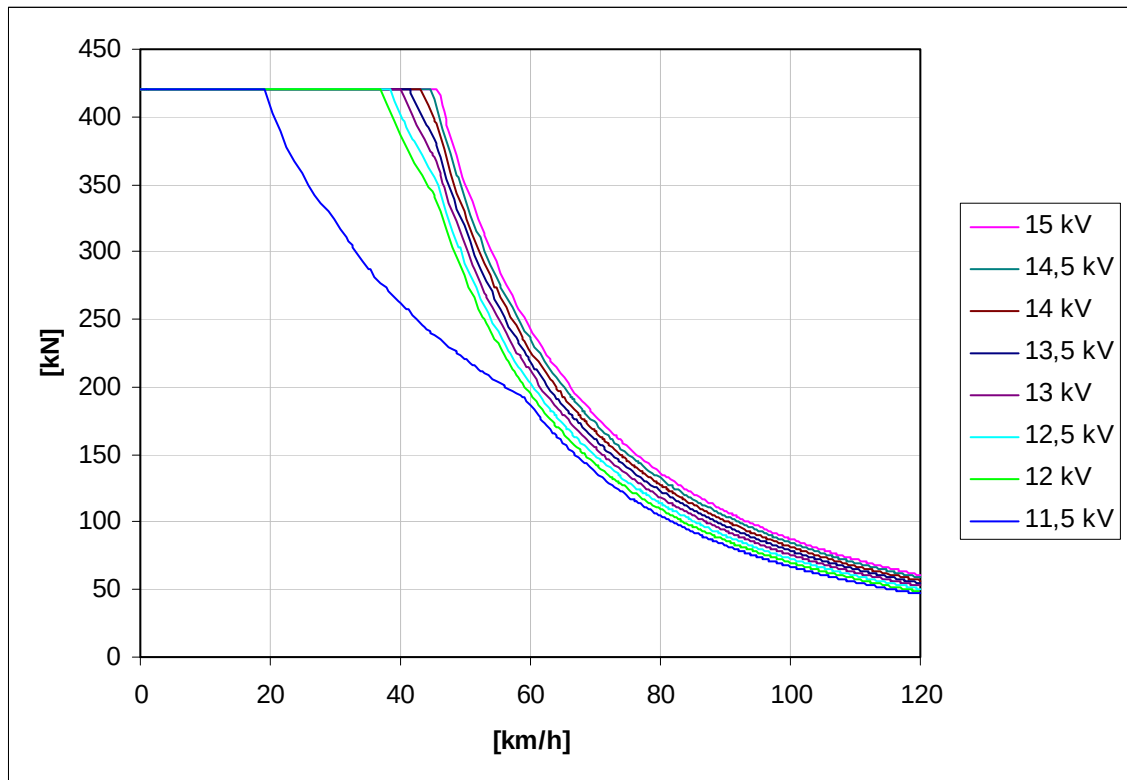
Äldre lindningskopplarlok eller kontaktorlok har inget reglersystem som ger dem någon speciell egenskap vid lägre spänning. Loket fungerar i princip ned tills spänningen bli så låg att hjälpkraftens spänning blir för låg för säker funktion. Lägre spänning till traktionsmotorerna kompenserar föraren manuellt genom att välja ett högre körläge. Detta medför att dessa lok klarar låg kontaktledningsspänning väl, samtidigt kan de ställa till med problem för andra fordon som drabbas av den lägre spänningen och för banmatningsnätet då spänningen sänks. Vid låg spänning ska förarna dock reducera strömuttaget så att linjebrytarna inte löser ut⁴⁴.

I Sverige finns cirka 60 lok i denna kategori och de flesta är ca 40-50 år gamla och har en begränsad återstående livslängd. Loken är framförallt av typen Ma och Dm/Dm3. Hector Rail

⁴³ Kalf, M., 2008, sid. 13.

⁴⁴ SJF 333, utg. 3 791101 2.2.4.2 och 3.5.3. Idag ersatt av nya föreskrifter med motsvarande innebörd.

har dock importerat 14 lok av typen BR 142, före detta ÖBB 1042, som är 30-40 år gamla. I rapporten har NSB El15, numera Hector Rail 161 använts, ett lok med lindningskopplare på högspänningssidan och likriktare före motorerna. Lokets dragkraftskurva visas i Figur 5-5.

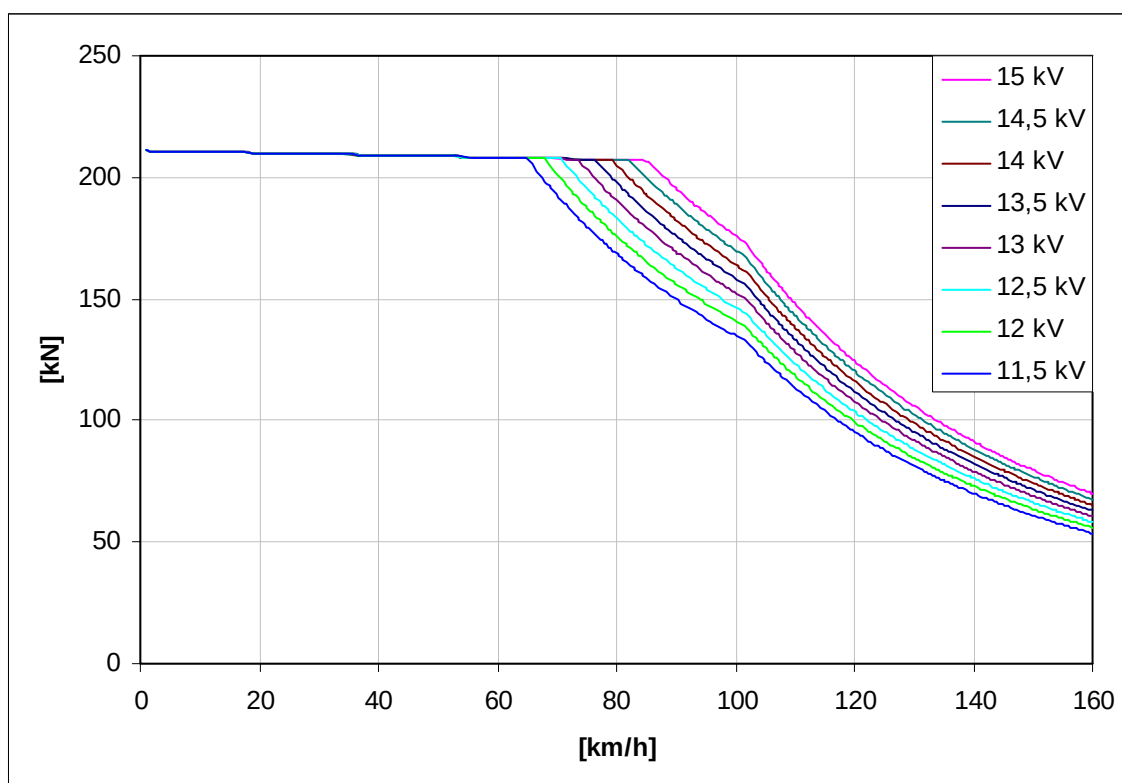


Figur 5-5. Dragkraftskurva NSB El 15, HR 161

Hector Rail 161 har ingen aktiv begränsning men vid spänningar under 12 kV är en begränsning inlagd i modellen i simuleringsprogrammet. Därför är också dragkraftskurvan relativt lika oberoende av spänning. Detta lok kommer att påverkas minst av en lägre kontaktledningsspänning. Det är dock sannolikt att loket skulle kunna ge högre prestanda vid spänningar över 15 kV eftersom det medger en högre motorspänning. Dock kan t.ex. lindningskopplaren vara utrustad med ett skydd så att den inte kan koppla upp mera när motorspänningen blir för hög.

5.6.2.4 Rc-lok, ingen aktiv begränsning

De flesta svenska lok och motorvagnar är tyristorstyrda. Totalt rör det sig om ca 360 Rc-lok och knappt 140 motorvagnar av typen X10 - X14. Loken är mellan cirka 20 och 40 år gamla och har lång återstående drifttid. Hos Green Cargo pågår för närvarande ett stort ombyggnadsprogram för att livstidsförlänga Rc-loken. Antalet kommer troligtvis att förbli relativt konstant de närmaste 10 åren för att sedan avta. Rc6 är växlat för 160 km/h medan Rc4 är växlat för 135 km/h, därför har Rc6 en något lägre dragkraft, dragkraftskurvan visas i Figur 5-6.



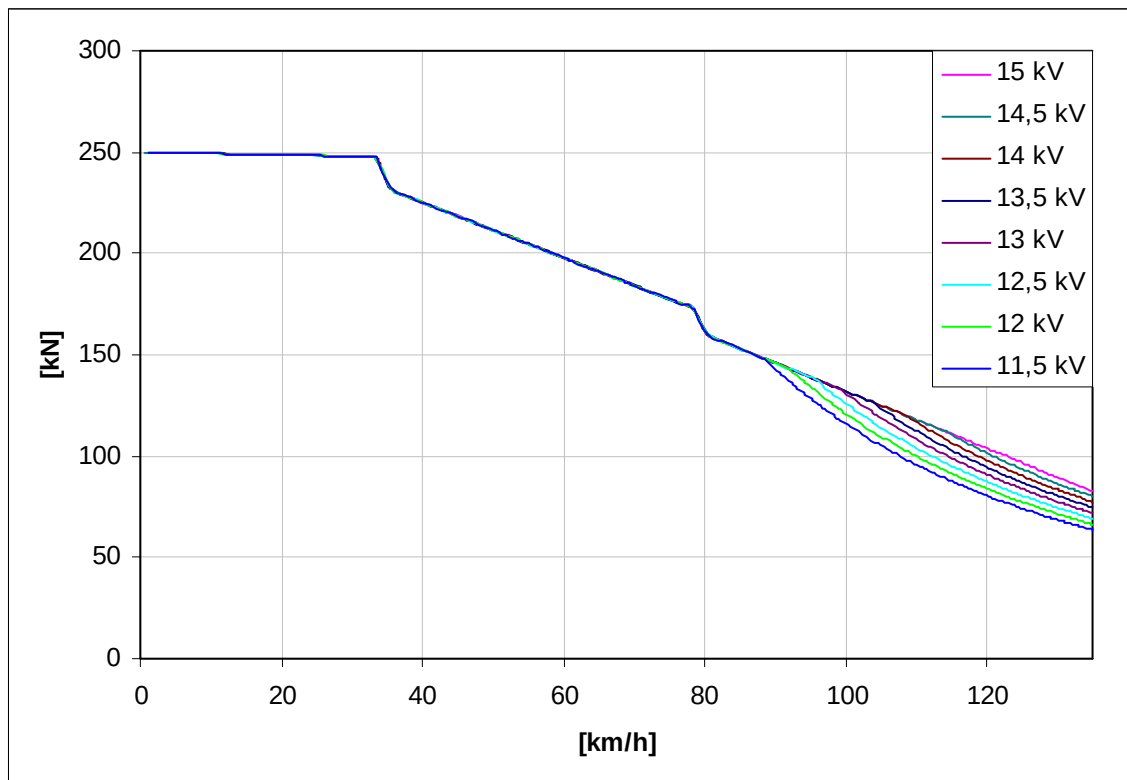
Figur 5-6. Dragkraftskurva Rc6

Rc-loken har två halvstyrda bryggor. Vid start är effektfaktorn ca 0,2 som stiger till cirka 0,9 strax innan bryggväxlingen, därefter sjunker den till 0,6 och stiger återigen till ca 0,83 vid 85 km/h då båda bryggorna är fullt utstyrda. Därefter är effektfaktorn ungefär konstant.⁴⁵ I teorin ger två seriekopplade bryggor samma effektfaktor vid halvt basvarvtal och basvarvtal men det kan finnas filter eller liknande som ger ett annat resultat.

Eftersom SJ körde allt tyngre godståg tilltog motorskadorna på Rc-loken på framförallt den backiga norra Stambanan. Detta eftersom motorerna överbelastades med en för hög ström under för lång tid, motorerna är inte konstruerade för att tåla maximal dragkraft mer än under kortare tidsperioder. En enkel lösning på detta problem var att modifiera loken på ett sådant sätt att dragkraften reducerades till nivåer som motorerna tålde kontinuerligt i det hastighetsområde där godstågen oftast körde i de långa stigningarna. På så sätt minskades antalet motorskador kraftigt.⁴⁶ I Figur 5-7 visas den modifierade dragkraftskurvan för godstågsvarianten av Rc-loken, Rc4, med en extra begränsning som reducerar motorströmmen när andra bryggan är nedstyrd. Kurvan överensstämmer dock inte helt med uppmätta data.

⁴⁵ Traintech: Elektriska data för loktyperna Rc4 och Rc6. Solna 2004.

⁴⁶ Lundén, Håkan, 2010.



Figur 5-7. Dragkraftskurva Rc4

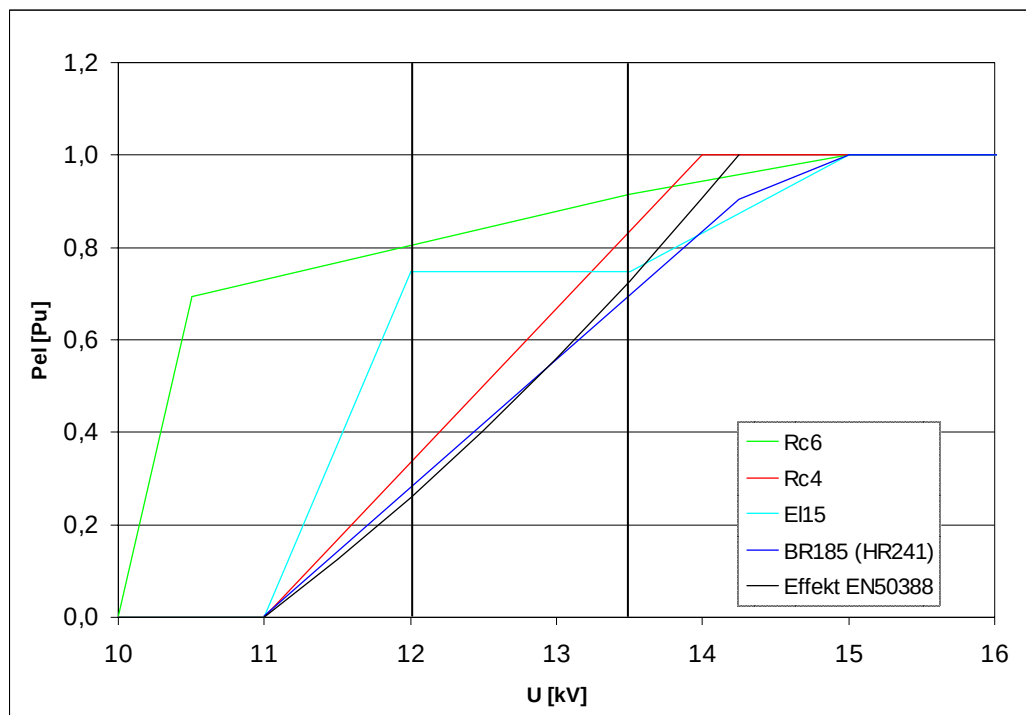
På grund av Rc4-lokets modifierade dragkraftskurva uppnår loket i princip full prestanda redan vid 11,5 kV och därutöver förändras relativt lite frånsett i högre hastigheter. I Figur 5-7 ligger kurvorna för 11,5-15 kV på varandra och syns därför inte.

Motorvagnar av typen X10-X14 har en spänningsberoende dragkraftsbegränsning som är utformad på ett sådant sätt att strömriktaren styrs ned under 12 kV för att vara helt nedstyrd vid 10 kV.⁴⁷ I ett fordon med styrda likriktare är det mycket enklare att minska dragkraften, dvs. motorströmmen, vid sjunkande spänning än att reducera fordonets effekt. Tanken med begränsningen är att skydda kraftförsörjningsnätet vid en låg spänning. Det är dock inte bekräftat om denna nedstyrning fortfarande är implementerad på detta sätt och på vilket sätt Rc-loken styr ned vid spänningar under 12 kV eller lägre.

⁴⁷ Fordonsbeskrivning X10, sid. 7.

5.6.3 Effekt som funktion av spänning

Ett annat sätt att visa lokens spänningsberoende prestanda är att visa deras effekt som funktion av spänningen. Denna effekt ger ramen till vilka dragkraftskurvor som är möjliga. Lokens effekt minskar redan vid spänningar under 15 kV, även om det inte är säkert att detta skulle vara fallet i verkligheten. Detta beror på att data kommer från modellerna i Tracfeed, se avsnitt 4.2.1.1.



Figur 5-8. Lokeffekt som funktion av spänning

Lokens effekt anges i per unit i Figur 5-8, dvs. effekten för varje lok divideras med effekten vid nominell spänning, 15 kV.

Figur 5-8 i sig ger inte så mycket information mer än att man kan se hur strömbegränsningen omräknad till effekt enligt EN50388 ser ut och att BR 185 följer denna tämligen väl. Dock måste man ha i åtanke att denna effekt tillsammans med hastigheten ger dragkraften och att dragkraften kan vara begränsad, därför kommer vissa loktyper inte att kunna utveckla effekten vid angiven spänning. Likaså är de linjära ökningarna fiktiva då de behövs för behandlingen i Tracfeed. Exempelvis har både Rc4 och Rc6 samma effekt men i beräkningen kommer effekten inte att utgöra begränsningen utan den modifierade dragkraftskurvan. Vidare säger effekten mycket lite, vanligtvis brukar timeffekten eller motsvarande anges som lokets effekt. För vissa lok är detta den maximala effekten, för andra lok kan den maximala effekten var mer än dubbelt så hög som timeffekten.

5.6.4 Effekter av strömbegränsningen

Strömbegränsningen enligt EN 50388 träder bara i kraft när tåget kräver lokets fulla effekt, dvs. i området över basvarvtalet där dragkraften avtar med $1/v$ men innan den avtar med $1/v^2$ eftersom effekten då avtar med $1/v$. För en Br 185 är bashastigheten 67,2 km/h och maximala effekten är konstant mellan 67,2-140 km/h. Detta innebär att strömbegränsningen bara får effekt med ett tåg som är så tungt eller stigningen så brant att full effekt behövs. I många situationer fås först påverkan när spänningen sjunkit mycket. För ett dragfordon som kan köra

i området där $F \sim 1/v^2$ kommer effekten att minska i det området och effekten av strömbegränsningen därmed också, dvs. den kommer först att ”börja” vid en lägre spänning.

En beställare kan därför mycket väl skriva i sin kravspecifikation att han vill ha ett fordon som levererar 4 MW vid 12 kV och tillverkaren ser till att fordonet följer strömbegränsningen enligt EN 50388 och samtidigt levererar önskad effekt. Samma resultat får man också om man väljer att använda två lok i stället för ett utan att öka tågvikten. Blir spänningen riktigt låg kommer dock effekten fortfarande att fördelas mellan fordonen och nätet kommer att skyddas från sammanbrott på grund av brist på aktiv effekt. Även om alla lok vore av samma typ kommer prestandan att påverkas mycket ojämnt, ett lok som är högt belastat påverkas kraftigt medan ett lågt belastat tåg inte påverkas alls när traktionsströmmen begränsas.

Däremot kan det vara ett väl strängt krav på kraftförsörjningen att effektbegränsningen redan inträder vid $0,95 \cdot U_{\text{nom}}$, dvs. vid 14,25 kV i stället för vid $0,90 \cdot U_{\text{nom}}$, 13,5 kV som det är vid 25 kV. Kravet medför att kraftsystemet måste kunna hålla spänningen inom en mycket snävare ram även om effekten finns tillgänglig men den kan inte överföras för att fordonet inte kan ta emot den. Dock ökar risken för effektpendlingar när spänningen är lägre.

6 Utvärdering av kontaktledningsspänningen

6.1 Inledning och förutsättningar

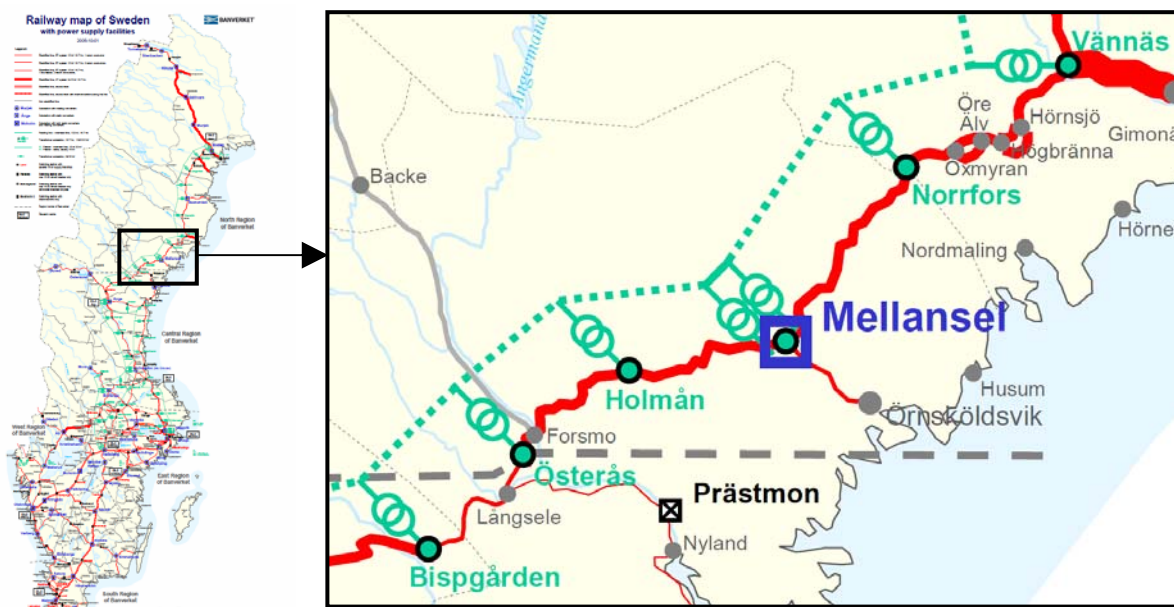
För att åskådliggöra problemen när ett kraftförsörjningssystem ska utvärderas har ett antal simuleringar med olika förutsättningar genomförts. Nedan presenteras utvalda resultat från några olika sträckor och fordonstyper. Resultaten täcker in de vanligaste fordonstyperna på både branta och flacka sträckor. De som visas nedan är Långsele – Vännäs, Uppsala – Gävle och Hallsberg – Falköping. För gångmotståndsdigram har även olika simuleringar på raka sträckor med olika lutningar genomförts men för värderingen av spänningen säger en verklig sträcka med en verklig spänning mera eftersom utfallet på väldefinierade teststräckor blir förutsägbart och det finns möjlighet att välja sträcka så att den passar ihop med utvärderingskriteriet. Efter presentationen av respektive sträcka visas exempel på simuleringen med något tåg och därefter diskuteras vilka faktorer som påverkat utfallen av simuleringarna. Slutligen sammanfattas slutsatserna från dessa tre sträckor.

6.2 Simulering Långsele - Vännäs

6.2.1 Beskrivning av sträckan och förutsättningarna

Sträckan Långsele - Vännäs är vald eftersom det framförallt är på dessa branta enkelspåriga sträckor med tunga tåg som det uppstår problem med kraftmatningen. Stigningarna är så branta att det är dessa som begränsar den högsta tillåtna vagnvikten för ett tåg. När flera lok används kan vagnvikten också begränsas av strömförsörjningen. Dessutom önskar operatörerna att köra tyngre tåg med fler lok, därför är det dessa sträckor som har aktualiserat frågan om spänningsvärdering.

Simuleringarna har gjorts på ett sådant sätt att de tydligt åskådliggör att faktorer som spänning eller försening inte ensamt kan användas för att bedöma kraftförsörjningens prestanda.



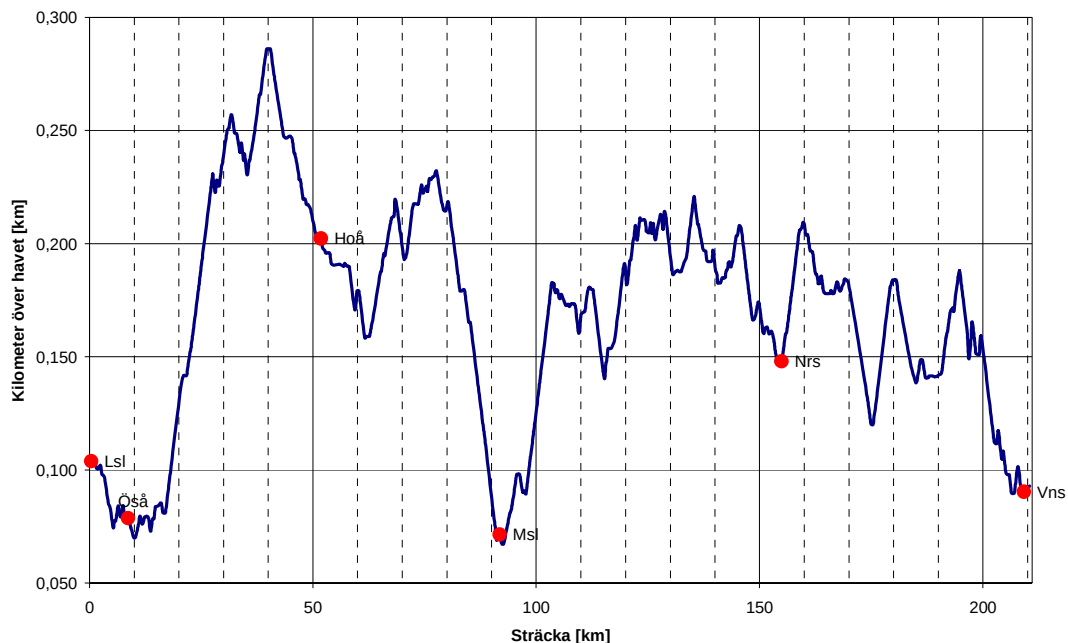
Figur 6-1. Karta Långsele - Vännäs⁴⁸

Långsele – Vännäs är en 209 km lång enkelspårig del av Norra Stambanan. Sträckan matas via 132 kV nätet och transformatorstationer. Omriktare finns i Ånge, Mellansel och

⁴⁸ Railway map of Sweden with power supply facilities. Banverket 2005-10-01

Bastuträsk. Kontaktledningen är utförd som BT-system med två återledare och förstärkningslina. De brantaste stigningarna är 16-18 % över flera kilometer och skillnaden mellan sträckans högsta och lägsta punkt är över 200 meter.

Enligt linjeboken gäller en maximal vagnvikt av 1100 ton för ett Rc och 2200 ton för dubbla Rc i båda riktningarna på sträckan⁴⁹. Vagnvikten är lägre än på andra sträckor på grund av de starka stigningarna. Begränsningen till 1100 ton är för att tågen inte ska bli så långsamma att de tar för mycket kapacitet utan de ska kunna hålla minst ca 40 km/h i de brantaste stigningarna. Värdet baserar huvudsakligen på erfarenhet⁵⁰. Operatörer kan dock avtala om att köra med högre vagnvikter och givetvis kan även specialtransporter köras där detta inte gäller. På denna sträcka använder dock t.ex. Green Cargo samma maximala vagnvikter som är angivna i linjeboken.



Figur 6-2. Höjdprofil Långsele - Vännäs⁵¹

I höjdprofilen, Figur 6-2, är matningsstationerna markerade med en röd prick, se tabellen över driftplatser för stationssignaturena. I Långsele finns ingen matningsstation men eftersom trafik i detta fall endast simulerats från Långsele och norrut kommer transformatorstationen i Bispgården att bidra till spänningshållningen.

⁴⁹ Linjebok BVF 646.7, Driftledningsområde Ånge, Utgåva 3, Ätr 3, 091004.

⁵⁰ Samtal med Anders Wahlberg (090817, BV Luleå), Armin Ruge (090814, BV Stockholm)

⁵¹ Profilen framräknad med data från Tracfeed, ursprungligen hämtad från BIS. Till skillnad från höjdprofiler skapade med BIS är denna inte kalibrerad vid varje trafikplats, det kan ge en avsevärd skillnad i meter höjd över havet för vissa trafikplatser. På en längre sträcka, som den använda, jämnar det ut sig. För simuleringsändamål jämnar det troligen också ut sig.

Tabell 6-1. Driftplatser på sträckan Långsele - Vännäs⁵²

Tpl	km	Tpl	km
Långsele (Lsl)	0	Björnsjö	106
Österås (Öså)	8	Björna	116
Forsmo	14	Långviksmon	127
Selsjön	20	Långvattnet	132
Backsjön	27	Trehörningsjö	141
Grönåsen	32	Norrfors (Nrs)	154
Stormyran	39	Brattsbacka	165
Aspeå	43	Oxmyran	168
Holmån (Hoå)	51	Öreälv	174
Skorped	62	Högbränna	180
Kälvattnet	72	Hörnsjö	186
Anundsjö	82	Degermyr	199
Mellansel (Ms)	91	Vännäs (Vns)	209
Gottne	95		

I Tabell 6-1 med alla driftplatser (platser där tåg kan mötas) är platserna där matningsstationerna ligger markerade med fet stil. I tabellen anges kilometer sträcka från utgångsstationen, dvs. som i Tracfeed. Detta är inte sträckans kilometrering.

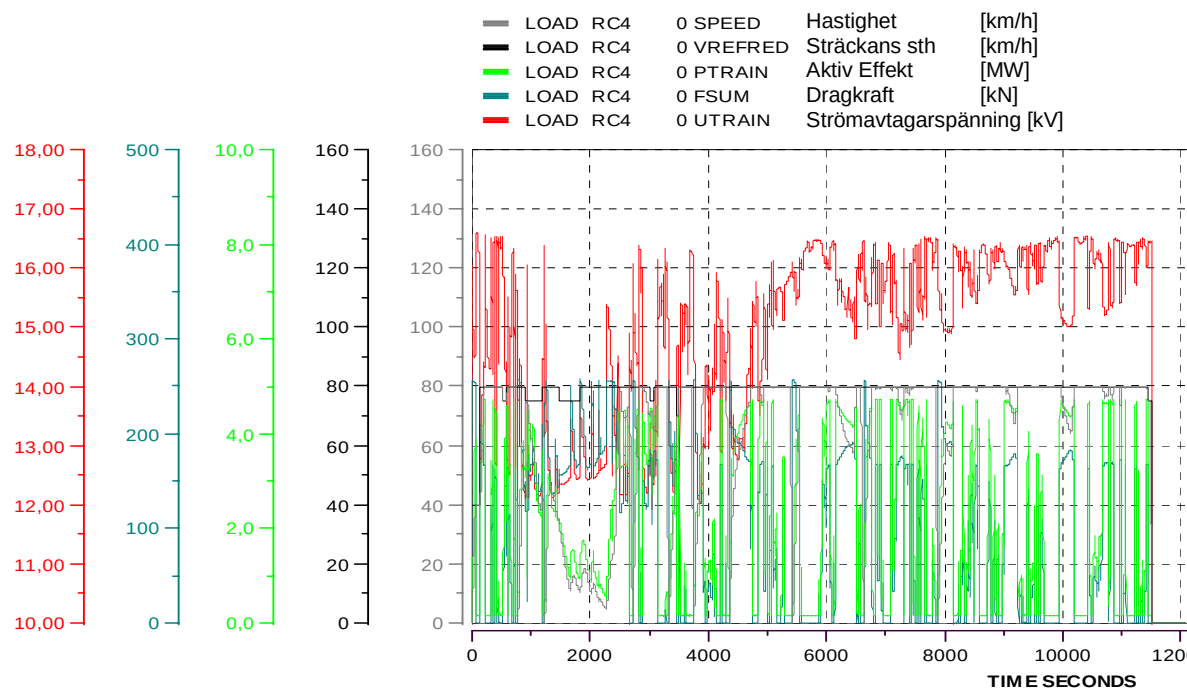
För dessa simuleringar har två tåg använts, dragkraft är i båda fallen Rc4, vagnvikten är 1000 eller 300 ton vilket ger en tågvikt på 1078 respektive 378 ton. Tågen är godståg och den största tillåtna hastigheten är 80 km/tim. Tågen är inspirerade av ett typiskt godståg på norra stambanan som ofta måste stanna för möten på den enkelspåriga sträckan, även i Selsjön mitt på den starka stigningen. Alla uppehåll har längden 0 sekunder, dvs. tåget bromsas ned till stopp för att omedelbart starta igen. Uppehållen finns med för att acceleration i stigningar kräver hög dragkraft som sedan begränsas av den låga spänningen.⁵³

Spänningen som matas ut är cirka 16,5 kV med små variationer beroende på transformatorernas och 132 kV nätets impedans. För att göra nätet svagare – eller simulera högre belastning – har matningsstationerna i Österås och Holmån stängts av. Därefter har ett antal tåg med olika loktyper körts med olika intervall, det är dessa som sänker spänningen för godståget vars spänning utvärderas, tåget sänker sin egen spännig också, men inte fullt lika mycket. Trafikeringen med de andra tågen har ändrats för varje simulering för att få olika fördelningar av låga spänningar att studera. I simuleringen kör tågen om varandra på enkelspårig sträcka vilket naturligtvis inte är möjligt i verkligheten men det är inte av betydelse för studeringen av spänningars påverkan på trafiken. Samma resultat skulle kunna ha uppnåtts med förbigångar på rätt ställe men simuleringen skulle ha blivit mer komplicerad.

⁵² Avstånd mellan Tpl för Tracfeed-simulering från <http://www.tydal.nu/php/tag/km.php> (090626)

⁵³ Se appendix för uppehållsmönster mm.

6.2.2 Resultat



Figur 6-3. Exempel från en simulering

Figur 6-3 visar ett exempel på ett diagram från Tracfeed. Tåget har en totalvikt av 1078 ton och dras av en Rc4. Totala körtiden är 3h 12min vilket ger en försening på 7,9 % då körtiden vid 15 kV konstant är 2h 58min. $U_{\text{mean useful}}$ är 14,49 kV och under totalt 12 sekunder är spänningen under 12 kV, som lägst 11,91 kV.

Mellan 1500 – 2500 sekunder syns tydligt hur tåget tappar farten, hastigheten sjunker tidvis under 10 km/tim, på grund av den låga spänningen, 12-12,5 kV. Tåget befinner sig i den starka stigningen precis i början av sträckan, mellan Forsmo och Grönåsen, se Figur 6-2.

I Tabell 6-2 visas resultatet från ett urval av simuleringarna. Tåget är alltid samma som ovan. Per tåg är U_{min} maximalt 2 min i området 11,80-12,00 kV av totalt 3-3,5 timmars körtid eftersom det är svårt att simulera svag banmatning utan att antingen behöva genomföra omfattande simuleringar med mycket trafik eller kortvarigt komma ned under 12 kV.

Tabell 6-2. Försening vid olika $U_{\text{mean useful}}$

$U_{\text{mean useful}}$	Försening
13,50 kV	0,0 % ⁵⁴
13,76 kV	33,6 % ⁵⁵
14,28 kV	9,9 %
14,49 kV	7,9 %
14,55 kV	2,5 %
14,56 kV	13,9 %
14,96 kV	0,6 %

Förseningen är skillnaden mellan körtiden vid 15 kV konstant spänning, dvs. en spänning vid vilken loket prestanda inte ska begränsas, och den verkliga spänningen. Körtiden vid 15 kV är 2h 58 min. Förseningen är beräknad med noggrannheten 1 sekund.

⁵⁴ Vid konstant spänning

⁵⁵ Om man kortvarigt tillåter spänningar under 12 kV, som tillåtet enligt EN 50163 vid störningar, i detta fall totalt 7 minuter vid knappt 4 tim körtid ($U=11,68-12$ kV) ökar förseningarna kraftigt fastän $U_{\text{mean useful}}$ fortfarande är godkänt.

Tabell 6-2 visar att korrelationen mellan försening och $U_{\text{mean useful}}$ är låg, detta då $U_{\text{mean useful}}$ låter en högre spänning kompensera en lägre spänning och inte tar hänsyn till spänningsfördelningen.

Låter man ett lätt godståg, 378 ton tågvtikt, i övrigt samma förutsättningar, köra på sträckan blir resultaten enligt Tabell 6-3.

Tabell 6-3. Försening med lätt tåg och konstant spänning

U [kV]	A _{max} [m/s ²]	Körtid	Försening
16,5	0,50	2h45 min	--
12,0	0,50	2h48 min	1,7 %
16,5	0,26	2h48 min	--
12,0	0,26	2h48 min	0,2 % (18 s)

Körtiden utan elektriska begränsningar har nu minskat med 13 minuter. Tåget med 1078 ton vikt skulle inte kunna köra sträckan vid 12 kV alls, då dragkraften skulle ha minskat så mycket att det inte skulle ha klarat vissa stigningar.

Då tåget med vikten 1078 ton har 0,26 m/s² som högsta acceleration vid simuleringen har simuleringen med det lätta tåget gjorts med dels accelerationen 0,5 m/s² som ligger som begränsning för detta tåg i Tracfeed samt med 0,26 m/s² så att båda godstågen accelererar lika kraftigt.

Att påverkan på körtiden är förhållandevis liten är på grund av de få uppehållen, 9 st. samt start och stopp samt att tåget i stället kommer att accelerera med 0,26 m/s² under längre tid. Fastän spänningen är så låg som 12 kV blir förseningen mycket låg.

6.3 Simulering Uppsala-Gävle

6.3.1 Beskrivning av sträckan och förutsättningarna

Sträckan Uppsala - Gävle är ett exempel på en relativt flack sträcka med hög hastighet. Alla tåg kan köra med sin största tillåtna hastighet en stor del av sträckan.



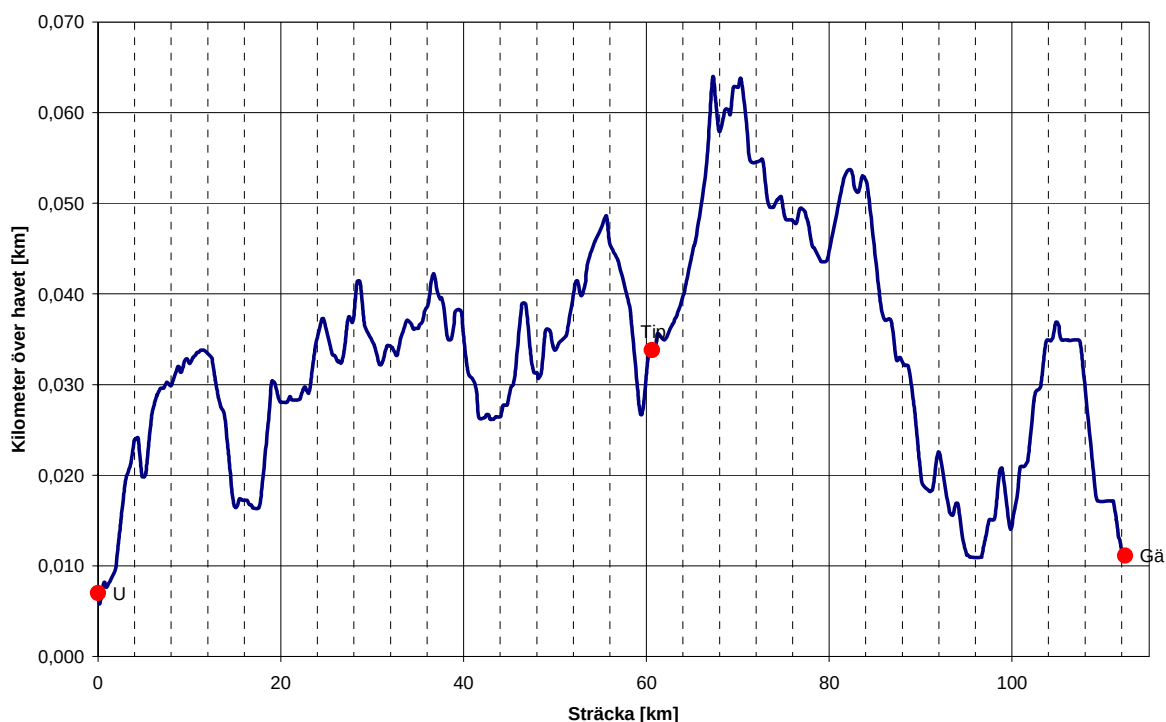
Figur 6-4. Karta Uppsala - Gävle⁵⁶

Uppsala – Gävle är en 113 km lång dubbelspårig del av Ostkustbanan. Strax norr om Uppsala är dock sträckan enkelspårig en kort bit liksom mellan Skutskär och Furuvi⁵⁷, en sträcka på några km. Sträckan matas via 132 kV nätet och transformatorstationer. Inga omriktare eller omformare finns på sträckan. Kontaktledningen är utförd som BT-system med två återledare men spåren är inte parallellkopplade. Den brantaste stigningen är 14 ‰ över knappt 700 m på en del av sträckan mellan Tierp och Orsskog. Skillnaden mellan sträckans högsta och lägsta punkt är 41 m, på den simulerade banan är den dock ca 60 m på grund av att höjderna inte är kalibrerade vid trafikplatserna. Sträckan är mestadels rak med stora kurvradier.

Sträckan är något kort för en bra utvärdering, men hittills finns bara kraftförsörjningsanläggningen norr om Uppsala som modell i Tracfeed och det förenklar avsevärt att använda en sträcka kraftförsörjningen redan finns. Annars skulle Hallsberg – Falköping varit en något längre representativ sträcka. Dock räcker Uppsala – Gävle för att visa att en sträcka av denna karaktär påverkar trafiken helt annorlunda. I ett senare exempel visas också resultat från en simulering på sträckan Hallsberg – Falköping, dock med konstant spänning.

⁵⁶ Railway map of Sweden with power supply facilities. Banverket 2005-10-01

⁵⁷ Egentligen mellan driftplatserna Turkiet och Furuvi södra.



Figur 6-5. Höjdprofil Uppsala - Gävle⁵⁸

I Figur 6-5. Höjdprofil Uppsala - Gävle, är matningsstationerna markerade med en röd prick, se Tabell 6-4 för stationssignaturena.

Tabell 6-4. Trafikplatser på sträckan Uppsala- Gävle⁵⁹

Tpl	km	Tpl	km
Uppsala C (U)	0	Tierp (Tip)	62
Löten	2	Orrskog	71
Samnan	6	Marma	80
Storvreta	13	Turkiet	97
Salsta	23	Skutskär Norra	98
Järlebo	33	Furuvik Södra	103
Örbyhus	44	Bomansberget	108
Tobo	49	Gävle C (Gä)	114
Skärpan	56		

I Tabell 6-4 är platserna där matningsstationerna ligger markerade med fet stil. I tabellen anges kilometer sträcka från utgångsstationen, dvs. som i Tracfeed. Detta är inte sträckans kilometrerering.

Spänningen som matas ut är cirka 16,5 kV med små variationer beroende på transformatorernas och 132 kV nätets impedans. För att göra nätet svagare – eller simulera högre belastning – har matningsstationen i Tierp stängts av. Därefter har ett antal tåg med olika loktyper körts med olika intervall, för att sänka spänningen ytterligare. Trafikeringen med de andra tågen har ändrats för varje simulering för att få olika fördelningar av låga spänningar att studera. I simuleringen kör tågen om varandra på samma spår som i föregående exempel, men det är inte av betydelse i sammanhanget.

⁵⁸ Profilen framräknad med data från Tracfeed, ursprungligen hämtad från BIS. Till skillnad från höjdprofiler skapade med BIS är denna inte kalibrerad vid varje trafikplats.

⁵⁹ Avstånd mellan Tpl från <http://www.tydal.nu/php/tag/km.php> (090903)

Tabell 6-5 listar de fordonskombinationer som har studerats vid olika spänningsfördelningar.

Tabell 6-5. Använda fordonskombinationer Uppsala-Gävle

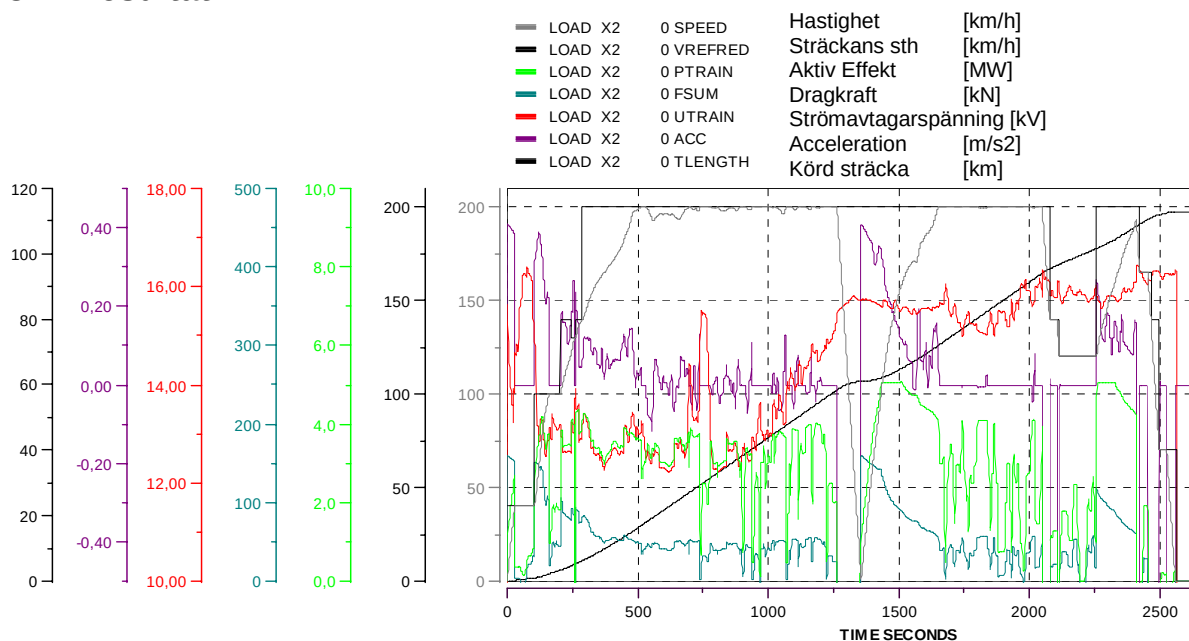
Tågtyp	Rc4a	Rc4b	Rc4c	BR185a	BR185b	EL15	Rc6a	X2
Vikt	378	378	1078	784	1684	1532	478	380
Sth	80	80	80	100	100	100	160	200
Överskridande	A	A	A	A	A	A	B	S

För Rc4a är maximalt tillåten acceleration $0,5 \text{ m/s}^2$, för Rc4b $0,26 \text{ m/s}^2$, ett rimligare värde för ett godståg. Överskridandet innebär att tåget på grund av lägre spårkrafter får överskrida banans sth angiven för A-tåg enligt Tabell 6-6:

Tabell 6-6. Procentuellt överskridande

Kategori	A	B	C	S
överskridande	0 %	10 %	15 %	25 %

6.3.2 Resultat



Figur 6-6. Exempel från en simulering med X2

I Figur 6-6 visas ett exempel på ett diagram från Tracfeed av en körning med en X2. Tåget har en totalvikt av 380 ton. Totala körtiden är 42 min 30 s vilket ger en försening på 0,7 % då körtiden vid 16,5 kV konstant är 42 min 12 s. $U_{\text{mean useful}}$ är 14,37 kV. Vid 12 kV konstant behöver samma tåg 46 min 28 s vilket motsvarar en försening på 11,1 %. Tåget har ett uppehåll på sträckan. Den låga spänningen gör att tåget accelererar mycket långsammare och tidvis har svårt att hålla hastigheten. Men eftersom sträckan är förhållandevis flack förblir påverkan ringa.

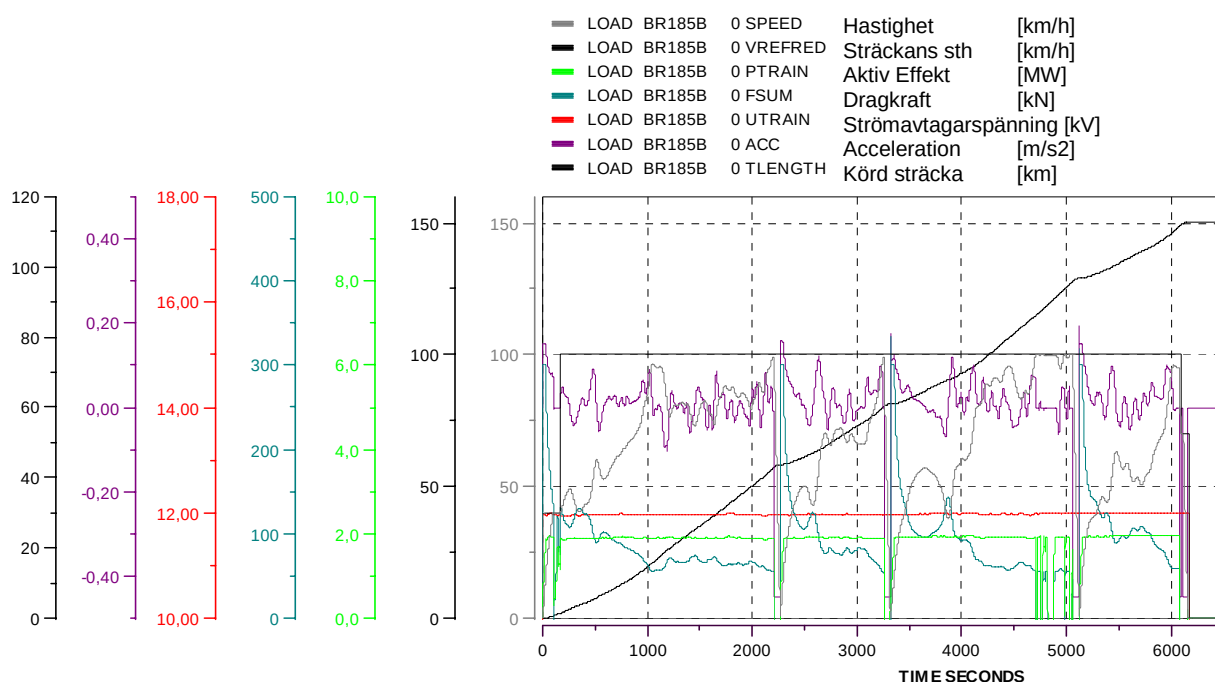
Tabell 6-7. Olika tågs försening vid olika spänningar U-Gä

Rc4a		Rc4b		Rc4c		BR185a		BR185b	
1,26	11,97	0,07	11,97	6,02	11,97	10,27	11,96	31,40	11,97
0,13	13,91	0,02	13,93	0,93	13,95	1,45	14,01	7,05	13,75
0,23	14,17	0,04	14,17	1,17	14,19	0,77	14,19	4,83	14,00
0,09	14,35	0,00	14,37	0,69	14,40	0,73	14,29	3,85	14,16
0,02	14,66	0,02	14,69	0,35	14,73	0,54	14,49	2,39	14,36

EL15		Rc6a		X2	
3,62	11,96	12,31	11,96	10,11	11,96
1,35	13,94	0,97	14,20	0,71	14,37
1,24	14,08	0,75	14,34	0,55	14,50
1,16	14,19	0,71	14,38	0,59	14,54
1,03	14,37	0,65	14,49	0,55	14,62

Försening [%] U_{mean useful} [kV]

Tabell 6-7 visar de simulerade tågens försening vid olika spänning. Första rad för respektive tåg med en $U_{\text{mean useful}}$ på 11,96-11,97 är vid 12 kV konstant med ideal kontaktledning. Impedanser i 132 kV nätet och transformatorstationerna sänker dock spänningen något. Tågen har olika uppehållsmönster beroende på tågslag.⁶⁰



Figur 6-7. Br185b vid 12 kV konstant

Figur 6-7 visar ett exempel på ett diagram från Tracfeed av en körning med en Br185 med en total tågvikt på 1684 ton. Spänningen är 12 kV konstant. Totala körtiden är 1h 42 min vilket ger en försening på 31,4 % då körtiden vid 16,5 kV konstant är 1h 18 min. Tåget har tre uppehåll på sträckan. Det syns tydligt hur lokets aktiva effektbegränsning begränsar effekten till ungefär 2 MW. Tåget kommer nästan aldrig upp i sth, 100 km/h, utom i utförsloten.

Vid ungefär samma vikt och med ett lok med liknande effekt, Rc4 kontra Rc6 och X2, reagerar persontågen känsligare på den låga spänningen än godstågen. Detta beror på godstågens lägre hastighet, sth 80 km/h för Rc4-tågen, till skillnad från persontågens sth 160

⁶⁰ Se appendix för uppehållsmönster mm.

km/h respektive 200 km/h. Likaså är godstågsloket lägre utväxlat vilket ger bättre acceleration medan för persontågen blir effekten och därmed dragkraften för låg för att komma upp i de hastigheter som tågen kommer upp i vid ostörd drift eftersom persontågen färdas i området över bashastigheten mycket större del av tiden.

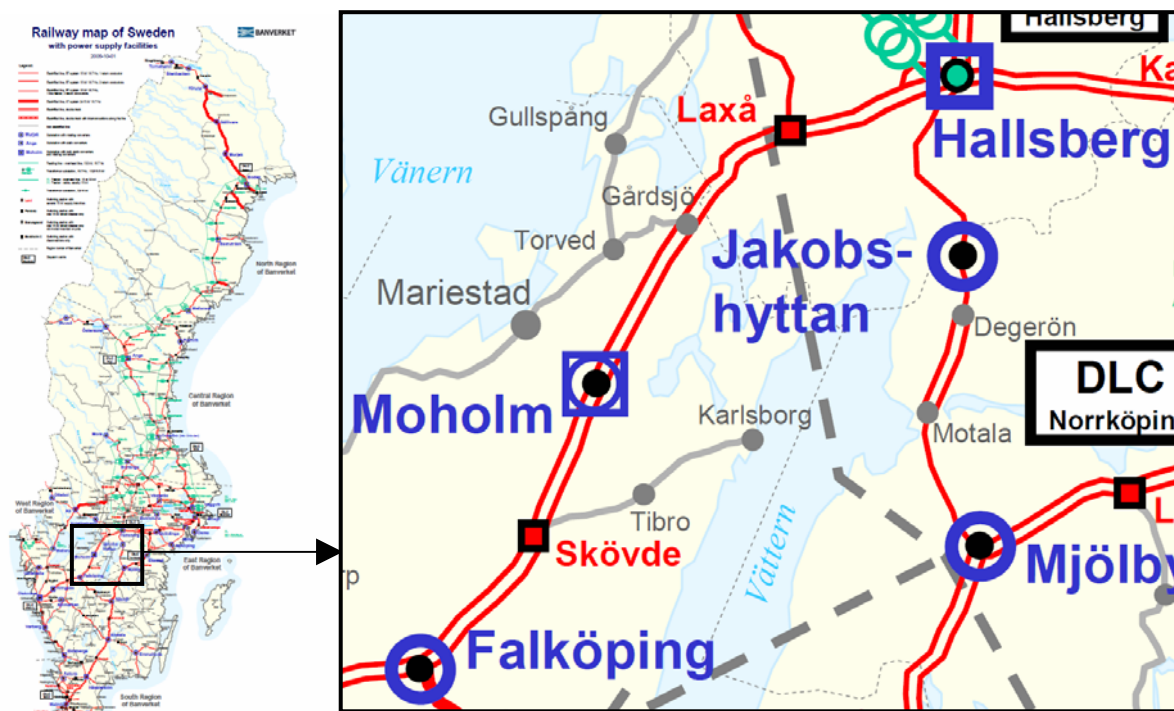
Vidare kan konstateras att denna sträcka är mindre känslig för små spänningsvariationer, en kortvarigt låg spänning ger inte samma effekter när den inträffar på en flack sträcka som när den inträffar i en brant stigning. Detta gör också att $U_{\text{mean useful}}$ i detta fall ger relativt bra resultat. Så länge lokets dragkraftsutnyttjande är relativt lågt, dvs. tågen hyfsat lätta, ger också en hög $U_{\text{mean useful}}$ endast en liten försening som är acceptabel. Så fort dock tågvikterna blir högre, exempelvis Br185b ovan, ger $U_{\text{mean useful}}$ 14,00 kV nästan 5 % försening. Detta är inte acceptabelt alls, $U_{\text{mean useful}}$ indikerar god spänning men 5 % försening är mer än alla marginaler i tidtabellen. Samtidigt finns givetvis möjligheten att 1600 ton för en Br185 egentligen är för tungt för vettig trafik, men det går inte att få svar på med denna metod och vikten är tillåten enligt linjeboken, dvs. det ska vara rimligt enligt Banverkets värdering idag.

6.4 Jämförande simulering Långsele - Vännäs och Hallsberg - Falköping

6.4.1 Beskrivning av sträckan och förutsättningarna

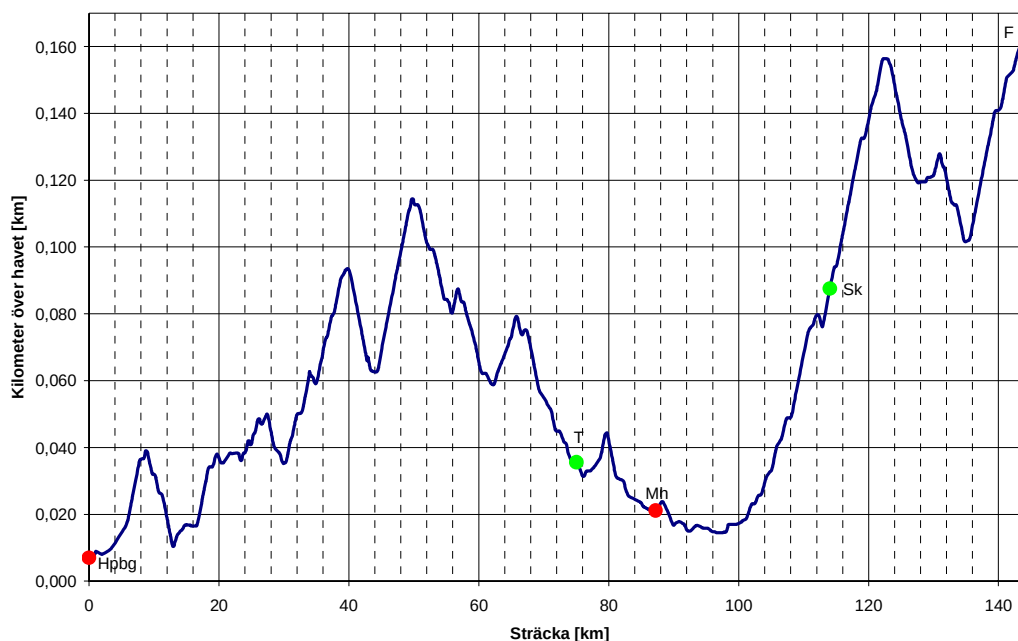
Sträckan Hallsberg (Hpbg) – Falköping (F) är en annan lång sammanhängande relativt flack sträcka med hög hastighet, dock stiger sträckan kraftigt upp mot Falköping. Delar av sträckan brukar också användas för höghastighetsprov. Hösten 2008 kom en modifierad Regina, Gröna Tåget, upp i 303 km/h vid proven som utfördes mellan Skövde och Töreboda⁶¹. Skövde (Sk) och Töreboda (T) är markerade som gröna prickar i höjdprofilen. Tyvärr finns dock elnätet inte som Tracfeed-modell för den sträckan. Av tidsskäl har därför simuleringarna utförts med en ideal kontaktledning, dvs. konstant spänning.

⁶¹ http://www.gronataget.se/templates/Page____455.aspx (090915)



Figur 6-8. Karta Hallsberg - Falköping⁶²

På en relativt stor del av sträckan Hallsberg - Falköping (längd 144 km) tillåts 200 km/h, tågen kommer alltså att köra över basvarvtal en mycket större del av sträckan än på Långsele - Vännäs. Däremot har sträckan en lång stigning vilken kommer att ge en påverkan på resultatet som gör att den inte är direkt jämförbar med sträckan Uppsala-Gävle.



Figur 6-9. Höjdprofil Hallsberg - Falköping⁶³

I Figur 6-9, höjdprofilen, är matningsstationerna markerade med en röd prick, men i simuleringen är kontaktledningen ideal och inmatningen sker bara i sträckans ändrar.

⁶² Railway map of Sweden with power supply facilities. Banverket 2005-10-01

⁶³ Profilen framräknad med data från Tracfeed, ursprungligen hämtad från BIS. Till skillnad från höjdprofiler skapade med BIS är denna inte kalibrerad vid varje trafikplats.

Spänningen är konstant. De gröna prickarna visar var höghastighetsproven med Gröna Tåget kördes, någonstans däremellan kom tåget upp i 303 km/h.

Nedan visas ett exempel där samma tåg körts på både sträckan Långsele - Vännäs och på sträckan Hallsberg - Falköping. Tågen har uppehåll på vägen, uppehållsmönstret är olika för person- respektive godstågen⁶⁴.

Tabell 6-8 förtecknar de fordon som har använts

Tabell 6-8. Fordon i jämförande simulering Hallsberg – Falköping och Långsele – Vännäs

Fordon	tågslag	Vikt	Adh. vikt	längd	sth	överskridande ⁶⁵
X2	Rst	380	73	165	200	S
Rc6	Rst	478	78	220	160	B
Rc4	Gt	1078	78	370	80	A
BR189	Gt	1087	87	370	100	A
El15	Gt	1532	132	510	100	A

Den maximala hastigheten begränsas antingen av tågets eller av banans sth.

Tabell 6-9. Förseningar på olika sträckor

U [kV]	16,5		15		14,25		13,5		12	
	Tid [s]		Tid [s]		Tid [s]	Förs. %	Tid [s]	Förs. %	Tid [s]	Förs. %
X2	3414		3414		3431	0,50	3446	0,93	3864	11,65
Rc6	3861		3861		3874	0,34	3891	0,77	4357	11,38
Rc6	7720		7720		7727	0,09	7727	0,09	8010	3,62
Rc4	7074		7074		7074	0,00	7074	0,00	8189	13,62
Rc4	10428		10428		10428	0,00	10428	0,00	---	---
BR189	5783		5783		5784	0,02	5791	0,14	6401	9,65
BR189	8964		8964		8972	0,09	8972	0,09	10457	14,28
El15	6313		6313		6365	0,82	6430	1,82	6574	3,97
El15	9926		9926		10016	0,90	10016	0,90	10344	4,04
Sträcka	Hallsberg - Falköping				Långsele - Vännäs					
Försening	0 < x < 0,3		0,4 < x < 1,0		1,1 < x		Lokets prestanda begränsar			

I Tabell 6-9 visas hur samma fordon påverkas av olika spänning på två olika sträckor. I kolumnerna står körtiden i sekunder, i raderna fordonstyperna. De raka körtiderna är simulerade på sträckan Hallsberg – Falköping, och de kursiverade blå körtiderna på sträckan Långsele – Vännäs. För spänningsnivåer under 15 kV har även förseningen i procent räknats ut och en enkel värdering i tre steg gjorts, beroende på vad som kan anses vara opåverkat av spänningen, acceptabelt eller för mycket. Fält där påverkan på körtiden är 0 är blåmarkerade. På sträckan Långsele – Vännäs fastnar Rc4 – tåget när spänningen är 12 kV.

Här tydliggörs att även sträckan ger en liknande påverkan som tågvikten, eftersom både stigning och tågsvikt utmärker sig genom att de ökar gångmotståndet och därmed ökar dragkraftsbehovet. Man ser också att ett tåg vid en viss spänning reagerar känsligare vid t.ex. den flacka sträckan och när spänningen sjunker ytterligare blir förseningen i stället högst på den branta sträckan. Detta beror på var bashastigheten hamnar i förhållande till hastigheten.

⁶⁴ Se appendix för noggrannare beskrivning.

⁶⁵ Se Fel! Hittar inte referenskälla..

6.5 Problem vid utvärderingen av kraftförsörjningen

Ovanstående exempel visar att olika spänningar påverkar trafiken helt olika. Generellt kan man konstatera att lätta och långsamma tåg är mindre känsliga än tunga eller snabba tåg – i båda fallen handlar det om att de sistnämnda kräver effekt under längre tid och därför slår den bristen mot körtiden till skillnad mot tåg som bara behöver effekt kortvarigt, de förstnämnda utnyttjar inte lokets kapacitet maximalt. På en flack sträcka tillkommer att de snabba tågen tappar mycket fart respektive behöver lång tid för att komma upp i hastighet och på en backig sträcka att de tunga tågen tappar mycket fart i stigningarna. Men det går inte att göra en generell utsaga utan det beror mycket på hur just en specifik fordonstyps dragkraftskurva påverkas av en lägre spänning och var på sträckan denna spänning uppstår.

6.5.1 Nackdelen med $U_{\text{mean useful}}$

Exemplen tidigare i detta kapitel visade att måttet $U_{\text{mean useful}}$ som ska ligga till grund för godkännande av en sträcka inte är särskilt användbart för att bedöma kraftförsörjningen om spänningsvariationerna är stora och trafiken blandad. Men en stark matning och homogen trafik ger måttet ett acceptabelt svar.

För ett medelvärde som $U_{\text{mean useful}}$ kan en högre spänning kompensera för en lägre spänning fastän loket inte får högre prestanda när spänningen överstiger ett visst värde. För Rc4 är denna spänning 13,5 kV. Exempelvis ger 10 min 12 kV och 5 min 16,5 kV ett $U_{\text{mean useful}}$ på 13,5 kV, dvs. godkänt enligt EN 50388 men ett Rc-lok med ett tungt tåg i en stigning kommer att köra i 5 min och stå still i 10 min. Å andra sidan har den konstanta spänningen 13,5 kV också ett $U_{\text{mean useful}}$ på 13,5 kV men kommer inte att påverka ett Rc4-lok alls.

För Rc4 kommer en spänning över 13,5 kV inte att bidra till att förkorta körtiden. Men även en spänning som begränsar lokets prestanda kommer knappt att påverka körtiden om loket inte behöver den prestandan i det ögonblicket, som visats med det lätta tåget i avsnitt 6.2.2. Vidare kommer lokförarens körstil att påverka $U_{\text{mean useful}}$. Detta eftersom andelen pådrag och andelen rullning kan skilja avsevärt mellan olika förare. Den ena accelererar kraftigt för att sedan rulla, den andra accelererar mindre och har ett svagt pådrag under längre tid. Då spänningsvärdena då loket drar på räknas i medelvärdet blir värdena olika.

$U_{\text{mean useful}}$ är antagligen framtaget med utgångspunkt av ett starkt nät där spänningshållningen inte är det primära problemet utan tillgången på aktiv effekt som det ser ut i t.ex. Tyskland. $U_{\text{mean useful}}$ förespråkas också av bland annat SNCF, på åtminstone de franska höghastighetsbanorna är det rimligt att kriteriet ger ett bra svar. Vidare utgår kraven huvudsakligen från moderna asynkronfordon. Men i de studerade fallen är problemet inte brist på aktiv effekt utan spänningshållningen på långa, delvis branta, sträckor.

Sammanfattningsvis kan konstateras att $U_{\text{mean useful}}$ är användbart för en likformig tågtrafik där tågen är förhållandevis lätta, dvs. lokens belastningsgrad vid hastigheter under basvarvtal låg. Så fort man dock försöker utvärdera en blandad trafik på backiga sträckor ger $U_{\text{mean useful}}$ inga användbara resultat längre. Även för tunga godståg är resultatet inte särskilt användbart.

6.5.2 Värderingen av en försening

Körtiden ensamt är inte en tillräcklig bedömningsgrund då förseningarna i de föregående exemplen var mellan 0 % och 33 % tämligen oberoende av spänningens medelvärde men påverkades väldigt starkt av tågvikten, dvs. lokets belastningsgrad. Lokets prestanda begränsas visserligen av den lägre spänningen men om tåget är relativt lätt påverkar det inte då lokets fulla prestanda endast behövs under mycket kort tid. Om en försening på exempelvis 25 % skulle värderas lika oberoende om tågvikten egentligen är på gränsen för vad som är rimligt eller tåget är mycket lätt, skulle risken vara stor att kraftförsörjningen suboptimeras då operatören egentligen borde köra med starkare lok.

Sträckans påverkan har samma effekt som tågvikten, en brantare sträcka kräver mer dragkraft samtidigt som en flack sträcka kräver effekt, dvs. dragkraft över basvarvtalet.

7 Faktorer som inverkar på körtiden och loks prestanda

7.1 Identifiering av faktorer som inverkar på körtiden

Sammanfattningsvis har i avsnitt 6.5 konstaterats att spänningen inte säger mycket om en eventuell försening och att körtiden inte är tillräcklig som kriterium för att tågen är mycket olika känsliga för låg spänning beroende på hur starkt loket belastas. Därför behövs ett mått på hur kraftigt loket är belastat och detta mått måste kvantifieras. Sedan ska det, tillsammans med körtiden, ge information om, huruvida spänningen behöver åtgärdas. En procentuell försening ensam ger god information om hur väl trafiken fungerar men inte tillräcklig information när trafiken inte längre fungerar väl då den inte kan peka på var bristerna finns, spänningen är bara en faktor bland flera.

Därur följer att man måste identifiera faktorer som påverkar körtiden och hitta ett mått som på ett så enkelt sätt som möjligt sammanfattar påverkan och som kan användas för att identifiera om prestandabristen beror på spänningen eller något annat.

Det går att räkna upp exempel på ett antal olika faktorer som inverkar på körtiden, en del av dessa går att påverka:

Banan

- Största tillåtna hastigheten för sträckan som i sin tur beror på ett stort antal faktorer som beror både på infrastrukturen och på fordonet eftersom olika fordon kan tillåtas köra olika fort på samma sträcka.
- Stigningar
- Signalsystem
- Kraftförsörjningssystemet

Fordonen

- Dragfordonets egenskaper, dvs. dragkraft, effekt och hastighet
- Lokets spänningsberoende dragkraftskurva
- Tågvikten
- sth för lok och vagnar
- axellast, boggityp mm som påverkar tillåten sth på aktuell sträcka
- adhesionsutnyttjandet

Alla dessa faktorer, utom signalsystemet och adhesionsutnyttjandet, kan man sammanfatta som lokets belastningsgrad, dvs. hur stor del av lokets prestanda som behövs för att kunna köra tåget på aktuell sträcka med aktuella begränsningar. Detta ger 4 möjliga driftsfall, se Tabell 7-1.

Tabell 7-1. Fyra driftsfall

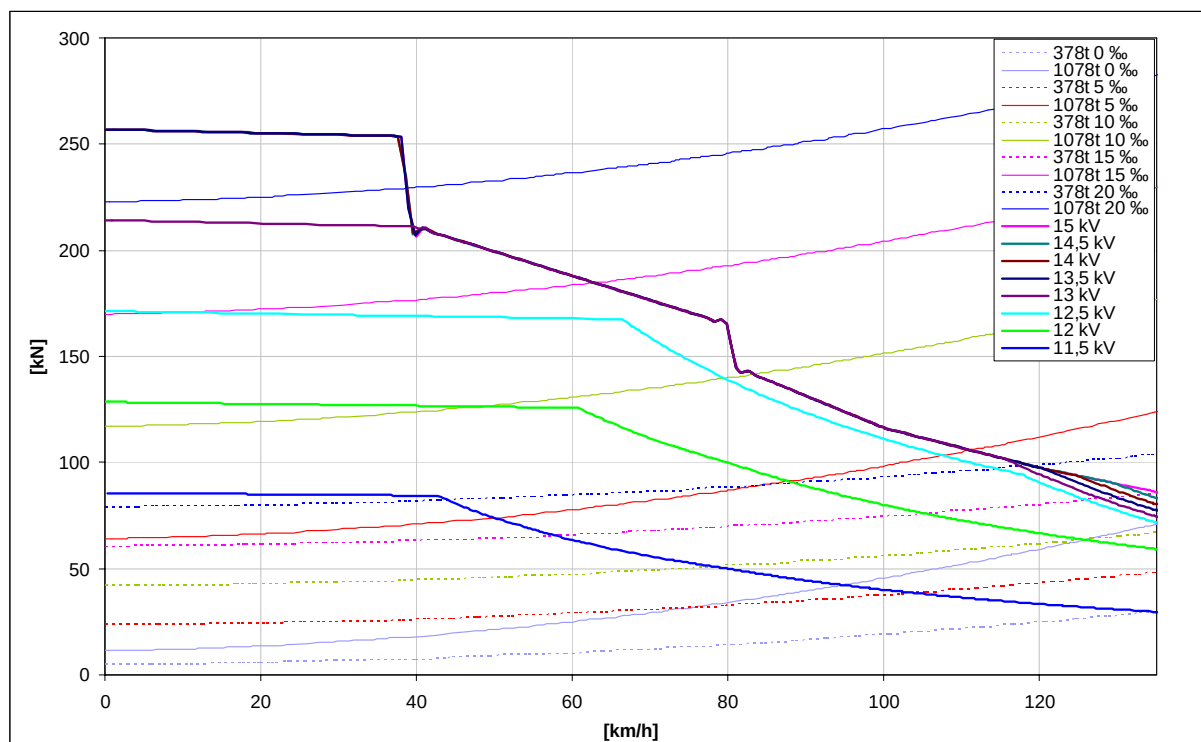
II Belastningsgrad låg Spänning god Ingen försening	I Belastningsgrad hög Spänning god Ingen försening
III Belastningsgrad låg Spänning dålig Ingen försening	IV Belastningsgrad hög Spänning dålig Försening

Övergången mellan de olika driftsfallen är flytande. Kraftförsörjningssystemet bör inte påverka trafiken men det bör inte heller behöva kompensera för underdimensionerad dragkraft, något som inte bara ställer högre krav på kraftförsörjningen utan också stjälar kapacitet av banan. Ett rimligt krav är att kraftförsörjningen inte ska behöva kompensera för prestandabristen i fjärde kvadranten utan att man behöver ställa krav på vilken prestanda loket måste ha i förhållande till vagnvikten eller liknande.

7.2 Loks prestanda

Enda prestandan ett lok kan leverera är dragkraft vid olika hastigheter. När loket tappar hastighet i en stigning är dess dragkraft vid den hastigheten fullt utnyttjad och det finns ingen marginal för acceleration längre. Men redan innan man kommer dit har accelerationen begränsats och därmed marginalen för spänningsvariationer minskat.

Ett loks prestanda kan åskådliggöras om dragkraftskurvan kompletteras med gångmotståndet för olika tåg i olika lutningar.



Figur 7-1. Dragkraftskurva för Rc4 och gångmotstånd för vissa tåg

I Figur 7-1 visas samma dragkraftskurva för Rc4 som i avsnitt 5.6.2.4 men gångmotståndet för ett Rc4-draget tåg med en vagnvikt på 300 respektive 1000 ton på en rak sträcka med olika stigningar har lagts till. Gångmotstånden är simulerade i Tracfeed och fordonsparmetrarna är tillhandahållna av Banverket.

Skärningspunkten mellan gångmotståndskurvan och dragkraftskurvan ger den balanserade hastigheten (jämviktshastigheten). I verkligheten kan gångmotståndet vara högre på grund av kurvor eller på grund av att godstågs luftmotstånd kan variera kraftigt. Den uttagbara dragkraften för loket kan också vara lägre, denna dragkraftskurva förutsätter ett adhesionsutnyttjande på ca 34 %, något som bara kan uppnås under optimala förhållanden. Samtidigt kan noggrannheten i indata också vara dålig. Dock kan man ur diagrammet verifiera maximala vagnvikten 1100 ton för ett Rc på den backiga Norra Stambanan då den kurvan kommer att skära Rc4-lokets dragkraftskurva strax under 40 km/h, en sorts tumregel

för rimlig lägsta hastighet för godståg i normala fall. Det finns dock inget generellt krav utan det görs en rimlighetsbedömning i varje enskilt fall.

7.3 Metoder för att åskådliggöra tillgången eller bristen på prestanda

På grund av att det finns så många olika faktorer som inverkar på banans kapacitet, vare sig den uttrycks i tåg per timme, ton per timme eller något annat mått är det också viktigt att kunna avgöra om det är kraftförsörjningsanläggningen eller andra faktorer som begränsar kapaciteten.

Även om önskan är att köra ett visst tåg är det av vikt att kunna identifiera om tåget skulle kunna köras vid en ideal kraftförsörjning och eventuellt hur stora marginalerna är, dvs. hur stor del av dragkraftskurvan som utnyttjas. Vidare är det önskvärt att kunna jämföra olika tåg med varandra. Så långt som möjligt ska alltså parametern vara viktad med fordonens egenskaper såsom dragkraft, effekt, vikt etc.

I avsnitt 7.1 har ett antal faktorer nämnts. De flesta parametrar som rör fordonen kan påverkas, likaså kan man bestämma sig för vilken kapacitet man vill ha, dvs. vilken acceleration eller hastighet tåget ska kunna uppnå. Olika parametrar kommer att begränsa annorlunda på olika delar av den tänkta sträckan.

Det kan också vara av intresse att kunna identifiera hur körtiden och känsligheten för låg spänning skulle påverkas om operatören körde med ett starkare lok eller en annan typ av lok. Ur kapacitetssynvinkel är det dock sällan önskvärt att dela upp ett tåg på två, däremot ska tågets prestanda inte vara sämre än övriga tågs prestanda. På exempelvis malmбанan bygger Banverket ut för tyngre och längre tåg fastän banan lätt skulle kunna klara av tre gånger så många tåg som idag då den tidigare haft den trafiken. Här handlar det alltså huvudsakligen om att operatören sparar pengar genom rationaliseringar som Banverket får bekosta genom att förstärka infrastrukturen, bland annat kraftförsörjningen.

Man kan tänka sig olika sätt för att tydliggöra tillgången eller bristen på prestanda för ett tåg, nedan nämns några möjligheter. Accelerationsmarginal och belastningsgrad kommer att utvecklas mera i nästföljande avsnitt.

7.3.1 Accelerationsmarginal

Eftersom dragkraften är den minsta gemensamma nämnare för allt som påverkar ett tåg är det närliggande att kvantifiera denna. För att värdera tillgänglig prestanda och spänningens påverkan är det dock av mindre intresse hur stor dragkraften är totalt. Av intresse är framförallt om det finns marginaler utöver att kunna hålla hastigheten under rådande omständigheter. Den marginalen är kraften som står till förfogande för acceleration, accelerationskraft. Divideras denna med tågets dynamiska massa fås den teoretiskt möjliga accelerationen, accelerationsmarginalen. Kan tåget inte hålla hastigheten blir den negativ.

7.3.2 Belastningsgrad

Ett annat sätt att beskriva prestandan är att undersöka hur stor del av lokets prestanda som behövs för att hålla hastigheten konstant vid varje givet tillfälle. Detta kan man göra vid både nominell spänning och en spänning som begränsar prestandan. Belastningsgraden formuleras som kvoten mellan gångmotståndet och maximal tillgänglig dragkraft. Om belastningsgraden är över 1 kommer tåget att tappa fart.

7.3.3 Hastighetsreferens

Hastigheten kan också kvantifieras genom att man undersöker skillnaden mellan referenshastigheten (sth) och den verkliga hastigheten rensat från situationer där tåget rullar eller bromsar. Metoden lämpar sig dock inte för att fastställa vilken marginal som finns och för att kunna ge en prognos om hur en viss körning skulle påverkas av en lägre spänning. Även detta kan jämföras med en körning vid nominell spänning men för att få en vettig jämförelse måste hastigheten i varje punkt på sträckan jämföras. Om referenståget har en högre hastighet innebär det att spänningen begränsar trafiken. Är hastigheten lägre kan det bero på att referenståget står stilla vid någon station. Ett medelvärde över en hel körsträcka ger dock endast tågets försening, något som redan tidigare konstaterats inte gav tillräcklig information.

7.3.4 Specifik effekt

Ett annat brukligt mått för att visa ett tågs prestanda är att ange den specifika effekten, dvs. hur många kW/ton tåget har eller måste ha. Men detta är mer ett mått som är intressant ur tillverkningsperspektiv när man t.ex. vill ha starka och lätta motorvagnar. Det ger ingen information om möjligheten att köra ett visst tåg på en viss sträcka då det är dragkraft som behövs. Ett lok med hög effekt men med hög bashastighet kommer att fungera sämre i godstågstjänst än ett lok med lägre effekt och lägre bashastighet. Exempelvis kan ett godståg med en Rc4 fungera bra medan det med Rc6 inte gör det – fastän loken har samma effekt och i övrigt också är i princip likadana. Dock är det första växlat för 135 km/h, det andra för 160 km/h.

7.4 Accelerationsmarginal

Med hjälp av accelerationsmarginalen visas vilken acceleration som vore möjlig i varje ögonblick med den tillgängliga dragkraften. Att använda acceleration i stället för en kraft har fördelen att den går att jämföra mellan olika tåg och på olika sträckor.

Metodens främsta nackdel är att det är svårt att identifiera brist på dragkraft annat än i ett fall, när tillgänglig dragkraft är lägre än gångmotståndet. Samtidigt låter sig värdena enkelt jämföras då det bara behövs en simulering för att fastställa med vilken dragkraft loket drar, vilket som är lokets maximala dragkraft vid rådande spänning och vilket som vore maximala dragkraften om spänningen inte skulle begränsa den.

När tåget accelererar går det inte enkelt att fastställa om accelerationen vore högre om det fanns mer dragkraft tillgänglig eftersom accelerationen kan begränsas av andra faktorer än endast spänningen. Simulatoren kör med maximalt möjlig acceleration tills hastigheten är uppnådd, accelerationen i utförda simuleringar begränsas endast av en angiven maximal acceleration, även adhesionen är ställd så högt att den inte begränsar. I verklig trafik kör man dock sällan med maximal acceleration utan föraren kör på ett sådant sätt som är lämpligt.

I en punkt där lokets aktuella dragkraft är lika med den högsta möjliga dragkraften är sannolikheten stor att det är brist på dragkraft. Om spänningen skulle vara högre skulle dragkraften och därmed accelerationen sannolikt också vara det. Trafiken som främst är aktuell att undersöka noggrannare är den som berörs av prestandabrist vid lägre hastigheter. Den har få uppehåll och påverkas därför inte så mycket av låg acceleration. Skillnaden mellan $0,50 \text{ m/s}^2$ och $0,26 \text{ m/s}^2$ är t.ex. 3 minuter på knappt 3 timmars körtid för ett lätt godståg med några uppehåll enligt simuleringar i avsnitt 6.2.2. För tåg med många uppehåll spelar dock accelerationen stor roll.

7.4.1 Gångmotstånd

Kraften som behövs för att dra ett tåg är

$$F = m_a \cdot a + D$$

där m_a är den dynamiska massan som är ca 5-10 % högre än statiska massan beroende på fordonstyp. D är gångmotståndet och består av⁶⁶:

Rullmotstånd	D_r
Luftmotstånd	D_a
Kurvmotstånd	D_k
Stigningsmotstånd	D_g

För att hålla konstant hastighet måste lokets dragkraft vara lika med gångmotståndet.

$$F=D= D_g + D_k + D_a + D_r$$

I Tracfeed beskrivs gångmotståndet av ett polynom⁶⁷

$$F_R = A + B \cdot v + C \cdot v^2$$

där F_R är summan av mekaniska gångmotståndet och luftmotståndet. A , B och C är fordonsspecifika konstanter, v är hastigheten. Med Tracfeeds beteckningar blir det enligt följande

$$FTOTRES=FRUNRES+FCURVE+FGRAD$$

$$FRUNRES=RRA+RRB \cdot v + TUNNEL \cdot RRC \cdot v^2$$

Där $FTOTRES$ motsvarar hela gångmotståndet, $FRUNRES$ summan av rullmotståndet D_r och luftmotståndet D_a . $FCURVE$ är kurvmotståndet D_k och $FGRAD$ stigningsmotståndet D_g . $TUNNEL$ är en faktor som är 1 när ingen tunnel finns men mellan 1,6-3 för en tunnel beroende på tunnelns geometri vilket på så sätt påverkar luftmotståndstermen i $FRUNRES$.⁶⁸

7.4.2 Accelerationskraft

Om lokets tillgängliga dragkraft är högre än gångmotståndet finns marginal för acceleration, om den är lägre kommer tåget att tappa fart. Kraften som står till förfogande för acceleration är

$$F_a = m_a \cdot a$$

och kallas fortsättningsvis accelerationskraft. Lokets enligt dragkraftskurvan maximalt möjliga dragkraft vid 15 kV betecknas F_{15} och dragkraften vid verklig spänning F_U .⁶⁹ Båda är också beroende av hastigheten v . Gångmotståndet däremot är beroende av v och sträckan s , som här får innefatta att gångmotståndet varierar över hela sträckan.

Den momentana accelerationskraften vid 15 kV är därmed

$$F_{a15} = F_{15} - D$$

⁶⁶ Se Elektrisk Traktion, Stefan Östlund, 2.1 gångmotstånd för en detaljerad beskrivning.

⁶⁷ För en detaljerad beskrivning av gångmotståndsberäkningarna som ligger till grund för beräkningar och indata till Tracfeed samt konstanterna A , B och C hänvisas till Lukaszewicz, Piotr, KTH 1995.

⁶⁸ TracFeed Simulation, User's Manual, Swedish Edition. Avsnitt 3.3.1 sid 18, version N 091026.

⁶⁹ 15 kV är valt då det är systemets nominella spänning. Men det går också att resonera som så att loket ska ha tillräcklig prestanda ned till en viss lägsta-spänning, till exempel 14,25 kV på samma sätt som man i t.ex. en 400 V installation inte kan dimensionera t.ex. en motor på ett sådant sätt att den inte klarar sin uppgift om spänningen skulle sjunka till 380 V. I ett program måste denna spänning vara valbar.

och vid verklig spänning

$$F_{aU} = F_U - D$$

Båda bör vara > 0 i normalfall men de kan tillåtas vara < 0 i vissa situationer beroende på hur man utformar ett kriterium. Exempelvis skulle man kunna kräva att accelerationskraften F_{a15} måste vara större än 0 upp till bashastigheten, däröver får den vara 0 eller negativ. Om accelerationskraften divideras med tågets massa fås accelerationsmarginalen, en fiktiv acceleration eller retardation beroende på tillgänglig kraft.

När man vill visa hur mycket accelerationen begränsas genom den lägre spänningen kan det vara fördelaktigt att redovisa en negativ accelerationskraft separat. F_{b15} är accelerationskraftsbrist vid 15 kV och F_{bU} accelerationskraftsbrist vid verklig spänning. Accelerationskraftsbristen förorsakad av för låg spänning blir

$$F_{bs} = F_{bU} - F_{b15}$$

Likaså är totala dragkraftsminskningen genom låg spänning

$$F_s = F_U - F_{15}$$

F_{bs} och F_b är endast lika om gångmotståndet är högre än tillgänglig dragkraft vid nominell spänning. Dragkraftsminskningen visar hur mycket lokets maximala prestanda påverkas, men inte hur mycket tåget påverkas i just detta fall, det gör endast accelerationskraftsbristen. Då accelerationskraftsbristen är en kraft i kN ger den ensamt ingen information om hur stor förseningen är utan den måste delas med tågets massa, då fås en acceleration som resultat, accelerationsbristen:

$$\frac{F_b}{1,1 \cdot m} = a_b [m/s^2]$$

7.5 Belastningsgrad

Lokets belastningsgrad relaterar dragkraften som behövs för att hålla hastigheten till dragkraften som finns till förfogande. Belastningsgraden är minst när loket står still och kommer sedan att öka på grund av lokets minskade dragkraft och det ökade gångmotståndet. Belastningsgraden ökar när spänningen sjunker.

$$FD_{15} = \frac{D}{F_{15}}$$

är lokets belastningsgrad. Denna ska vara < 1 i normalfall. $FD_{15} > 1$ innebär att lokets dragkraft inte räcker till för att hålla hastigheten. Lokets belastningsgrad vid verklig spänning blir på samma sätt

$$FD_U = \frac{D}{F_U}$$

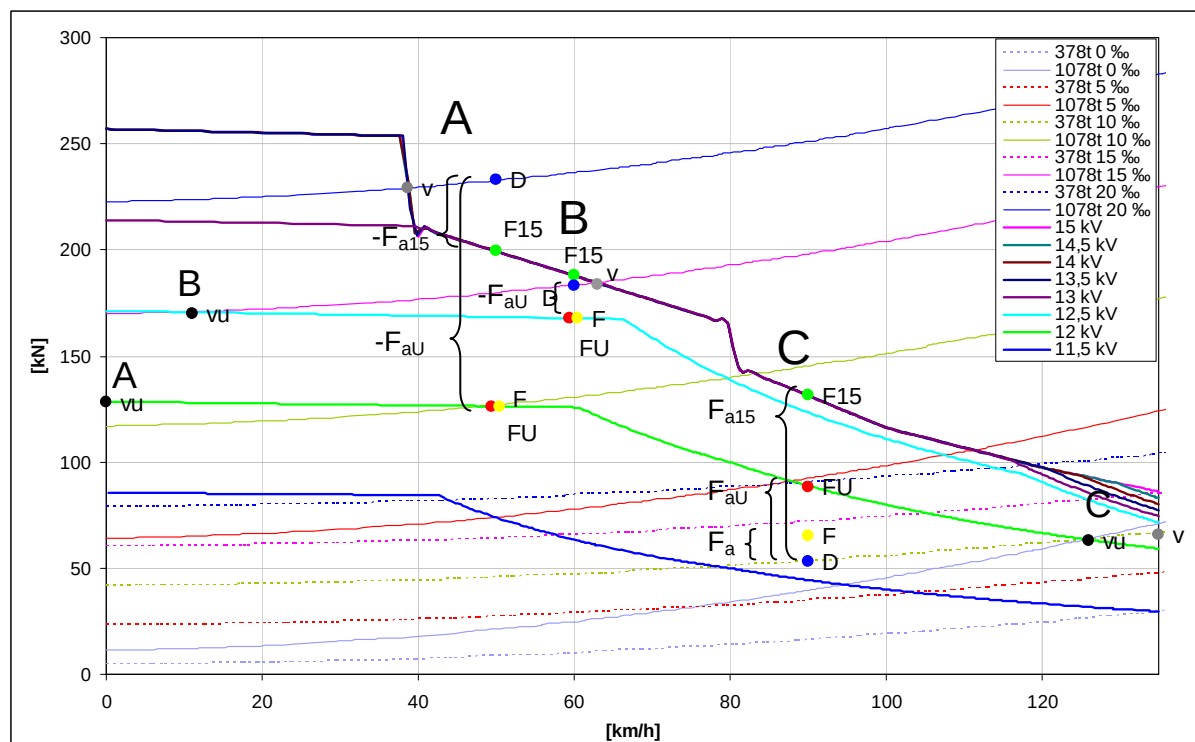
Vid hastigheter över bashastigheten kan det förekomma att belastningsgraden är högre än 1, dvs. att tåget tappar fart. Ofta är det också planerat, till exempel att ett snabbtåg eller tungt godståg tappar lite hastighet när det kommer in i en stark stigning i maximal hastighet.

För varje tåg kan man också fastställa dragfordonets belastningsgrad vid stillestånd. För en Rc4 med 1078 ton i 18 promille stigning skulle det bli:

$$FD_{15} = \frac{D_{1078t,18}}{F_{Rc \max}} = \frac{200}{250} = 0,8$$

Idag finns inget uttalat krav på ett loks prestanda, men 0,8 skulle ungefär motsvara kravet på maximal tågvykt för ett tåg draget av ett Rc-lok på till exempel Norra Stambanan. För ett Rc6-lok skulle belastningsgraden med samma tåg bli ca 0,9 då det är växlat för en högre hastighet.

7.6 Sammanfattning av krafterna i ett dragkraftsdiagram



Figur 7-2. Dragkraftsdiagram för Rc4 med krafter vid olika driftsfall

I Figur 7-2 visas tre olika driftsfall, A, B, C (från vänster till höger). De tidigare införda krafterna har infogats med nedanstående beteckningar.

F_{15}	maximala dragkraften endast beroende på hastigheten men inte på spänningen
F_U	maximala dragkraften beroende på hastigheten och spänningen
F	lokets aktuella dragkraft
D	gångmotståndet
v	balanserade hastigheten endast beroende på v , dvs. där $F_{15}=D$
vu	balanserade hastigheten beroende på v och u , dvs. där $F_U=D$
F_{a15}	accelerationskraft endast beroende på hastigheten men inte på spänningen
F_{aU}	accelerationskraft beroende på hastigheten och på spänningen
F_a	aktuell kraft för acceleration
F_s	dragkraftsminskning förorsakad av låg spänning

Eftersom varken hastighet, spänning eller gångmotstånd är konstanta kommer detta att variera i varje simuleringssteg, men i varje steg kommer det att se ut som ovan. Om sträckan vore en konstant stigning med konstant spänning skulle hastigheten komma till ett jämviktsläge.

De använda värdena är ungefärliga men det är inte av betydelse för att visa principen.

7.6.1 Fall A

I detta fall är dragkraften inte tillräcklig i något fall. Tåget har accelererat på en flack sträcka och sedan kommit in i en stigning. Hastigheten är 50 km/h, tågvikten 1078 ton och stigningen 20 ‰. Gångmotståndet D är 233 kN men F_{15} endast 200 kN, accelerationskraften är därmed negativ, -33 kN. Då dock spänningen endast är 12 kV är tillgänglig dragkraft F_U endast 126 kN. Denna utnyttjas också helt. Den balanserade hastigheten vid 15 kV är 38 km/h medan den vid 12 kV blir negativ i denna stigning, dvs. loket förmår inte att hålla tåget stillastående. Detta innebär att belastningsgraden vid verklig spänning och stillestånd redan är över 1.

$$D=233 \text{ kN} \quad F_{15}=200 \text{ kN} \quad F=F_U=126 \text{ kN}$$

$$F_{a15} = F_{15} - D = -33 \text{ kN}$$

$$F_{aU} = F_U - D = 126 - 233 = -107 \text{ kN}$$

$$FD_{15} = \frac{D}{F_{15}} = \frac{233}{200} = 1,17 \qquad FD_U = \frac{D}{F_U} = \frac{233}{126} = 1,85$$

$$F_s = F_{15} - F_U = 200 - 126 = 74 \text{ kN}$$

På grund av att accelerationsmarginalen är negativ kommer tåget att retardera med följande värden

$$\frac{F_{a15}}{1,1 \cdot m} = a_{15} = \frac{-33}{1,1 \cdot 1078} = -0,03 \text{ m/s}^2$$

$$\frac{F_{aU}}{1,1 \cdot m} = a_U = \frac{-107}{1,1 \cdot 1078} = -0,09 \text{ m/s}^2$$

Retardationen förorsakad endast av den låga spänningen är

$$a_U - a_{15} = -0,09 - (-0,03) = -0,06 \text{ m/s}^2$$

7.6.2 Fall B

I fall B är dragkraften tillräcklig vid 15 kV men för låg vid den rådande spänningen. Hastigheten är 60 km/h, tågvikten 1078 ton och stigningen 15 ‰. F_{15} är något högre än gångmotståndet D , tåget kommer att kunna accelerera upp till den balanserade hastigheten v vilken är ca 63 km/h. Men eftersom spänningen endast är 12,5 kV räcker dragkraften inte till för att hålla hastigheten. Dragkraften F och F_u , den maximalt möjliga dragkraften vid 12,5 kV, sammanfaller. Punkterna är ritade bredvid varandra för ökat tydlighet. Tåget kommer dock att tappa hastighet tills det nått den balanserade hastigheten v_u , ca 11 km/h i detta fall.

$$D=185 \text{ kN} \quad F_{15}=190 \text{ kN} \quad F=F_U=170 \text{ kN}$$

$$F_{a15} = F_{15} - D = 5 \text{ kN}$$

$$F_{aU} = F_U - D = 170 - 185 = -15 \text{ kN}$$

$$FD_{15} = \frac{D}{F_{15}} = \frac{185}{190} = 0,97 \qquad FD_U = \frac{D}{F_U} = \frac{185}{170} = 1,09$$

$$F_s = F_{15} - F_U = 190 - 170 = 20 \text{ kN}$$

Dragkraftsminskningen F_s är 20 kN men accelerationskraftsbristen förorsakad av låg spänning är endast 15 kN eftersom det vid nominell spänning fanns 5 kN utöver gångmotståndet.

Vid nominell spänning skulle tåget kunna accelerera med följande värde

$$\frac{F_{a15}}{1,1 \cdot m} = a_{15} = \frac{5}{1,1 \cdot 1078} = 0,004 \text{ m/s}^2$$

men på grund av den låga spänningen kommer tåget i stället att retardera med

$$\frac{F_{aU}}{1,1 \cdot m} = a_U = \frac{-15}{1,1 \cdot 1078} = -0,01 \text{ m/s}^2$$

Retardationen förorsakad av den låga spänningen är därför endast $-0,01 \text{ m/s}^2$.

7.6.3 Fall C

I sista fallet är dragkraften alltid tillräcklig, oberoende av spänning. Tåget kör 90 km/h. F_{15} är 132 kN men då spänningen endast är 12 kV är F_U endast 89 kN. Då dock tåget endast väger 378 ton och stigningen är 10 ‰ är gångmotståndet 53 kN. Tåget har precis uppnått sth, därför är accelerationen låg (på väg att bli 0) och lokets dragkraft 65 kN. Detta ger att $F_a = 13 \text{ kN}$ och därmed är $a = 0,03 \text{ m/s}^2$. Den balanserade hastigheten vid denna spänning skulle vara 126 km/h men det ligger över tågets sth. Den balanserade hastigheten vid 15 kV ligger långt över 135 km/h, Rc4-lokets sth. Accelerationskraften F_a är 79 kN och vid 12 kV 36 kN

$$D=53 \text{ kN} \quad F_{15}=132 \text{ kN} \quad F=65 \text{ kN} \quad F_U=89 \text{ kN}$$

$$F_{a15} = F_{15} - D = 132 - 53 \text{ kN} = 79 \text{ kN}$$

$$F_{aU} = F_U - D = 89 - 53 = 36 \text{ kN}$$

$$FD_{15} = \frac{D}{F_{15}} = \frac{53}{132} = 0,40 \qquad FD_U = \frac{D}{F_U} = \frac{53}{89} = 0,60$$

$$F_s = F_{15} - F_U = 132 - 89 = 43 \text{ kN}$$

Den maximala dragkraften minskar med 43 kN på grund av den låga spänningen, men det påverkar inte trafiken. I praktiken kommer det dock att märkas genom att accelerationen tar längre tid men vid t.ex. ett typiskt godståg med relativt få uppehåll påverkar detta bara ytterst lite.

De maximalt möjliga accelerationerna är

$$\frac{F_{a15}}{1,1 \cdot m} = a_{15} = \frac{79}{1,1 \cdot 378} = 0,19 \text{ m/s}^2$$

$$\frac{F_{aU}}{1,1 \cdot m} = a_U = \frac{36}{1,1 \cdot 378} = 0,09 \text{ m/s}^2$$

7.7 Grafisk presentation av accelerationskraften

I detta avsnitt visas principen för att studera accelerationskraften under olika tågfärder. I de visade fallen saknas dock utdatavariabler från Tracfeed. I avsnitt 7.8 har Tracfeed kompletterats så att alla variabler presenterade i avsnitt 7.4-7.7 kan beräknas.

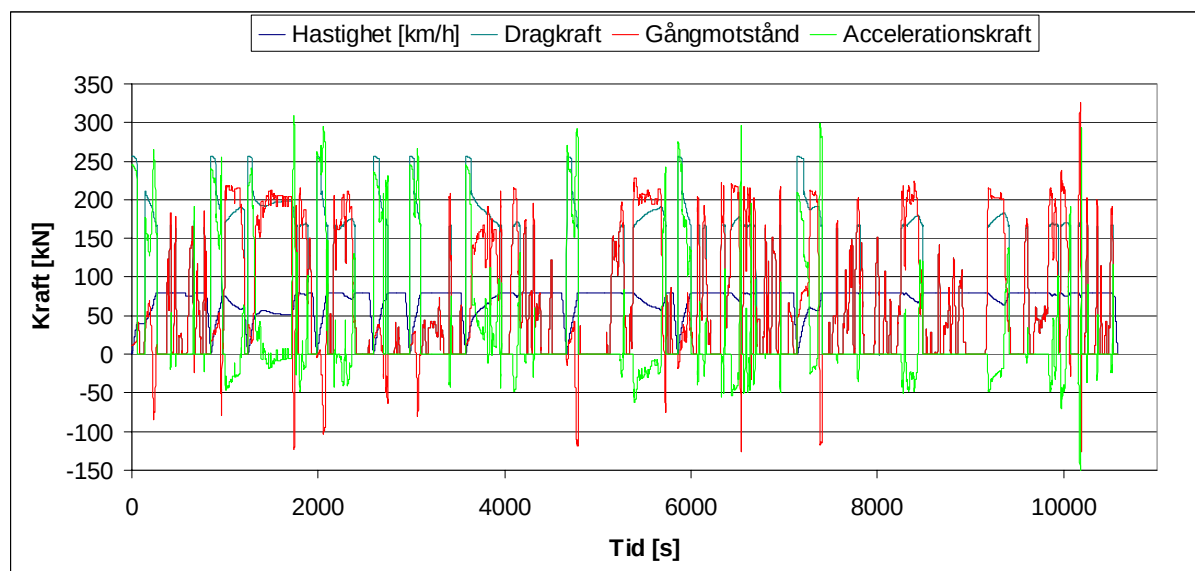
Accelerationskraften kan enkelt åskådliggöras. För de manuellt beräknade fallen har olika simuleringar från sträckan Långsele - Vännäs använts. Se avsnitt 6.2.

Diagrammen visar hur mycket dragkraft som används för acceleration eller saknas för att hålla hastigheten konstant. På sträckor där tåget rullar eller bromsar är dragkraften 0 och därmed saknas indata för den manuella beräkningen av gångmotstånd och

accelerationsmarginalen. Gångmotståndet varierar med så hög frekvens för att banans stigning varierar snabbt och detta påverkar direkt gångmotståndet, hastigheten varierar långsammare. Ett negativt gångmotstånd innebär att tåget rullar nedför i en lutning.

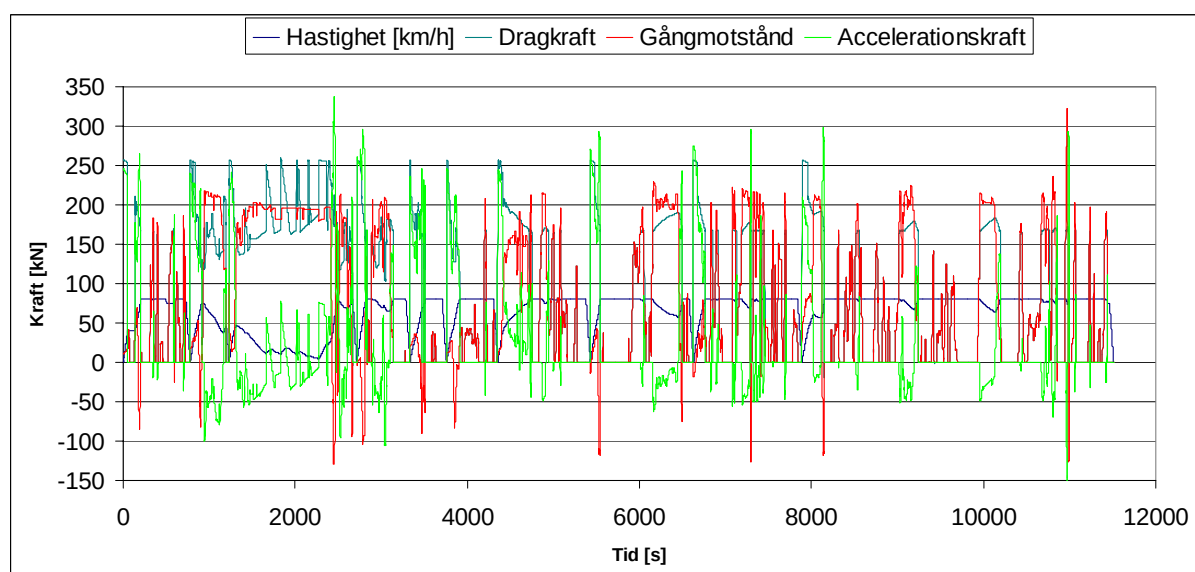
Metoden möjliggör inte att se hur mycket tåget skulle kunna accelerera, det åskådliggör bara när kraften inte räcker till för att hålla hastigheten. Däremot skulle det inte vara något problem att modifiera Tracfeed på ett sådant sätt att det finns en utdatavariabel som är lokets maximala dragkraft i varje simulationssteg och ur den beräkna hur mycket loket skulle kunna accelerera.

Se appendix för beräkningen.



Figur 7-3. Rc4, 1078 ton, 16,5 kV konstant

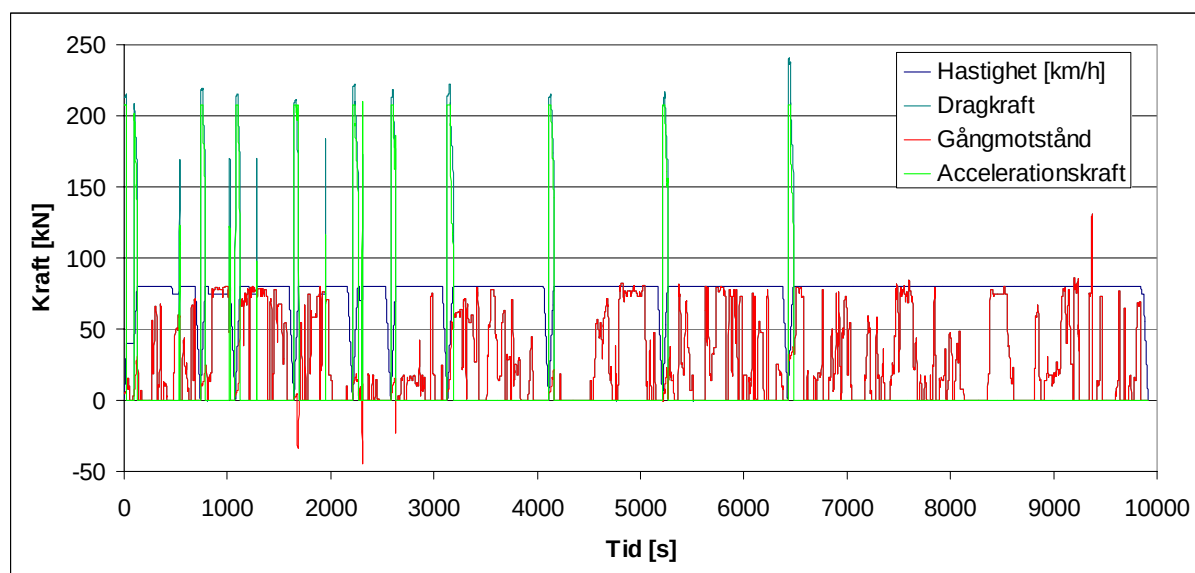
Vid en stark strömförsörjning och med en tågvikt på 1078 ton syns redan att accelerationskraften är negativ på många ställen, se Figur 7-3, lokets dragkraft räcker alltså inte till för att hålla hastigheten. Hastigheten tillåts sjunka ned till under 50 km/h i vissa stigningar. Ett tåg där accelerationskraften ser ut på detta sätt kommer att bli mycket känsligt för påverkan av lägre spänning.



Figur 7-4. Rc4, 1078 ton, 7,9 % försening

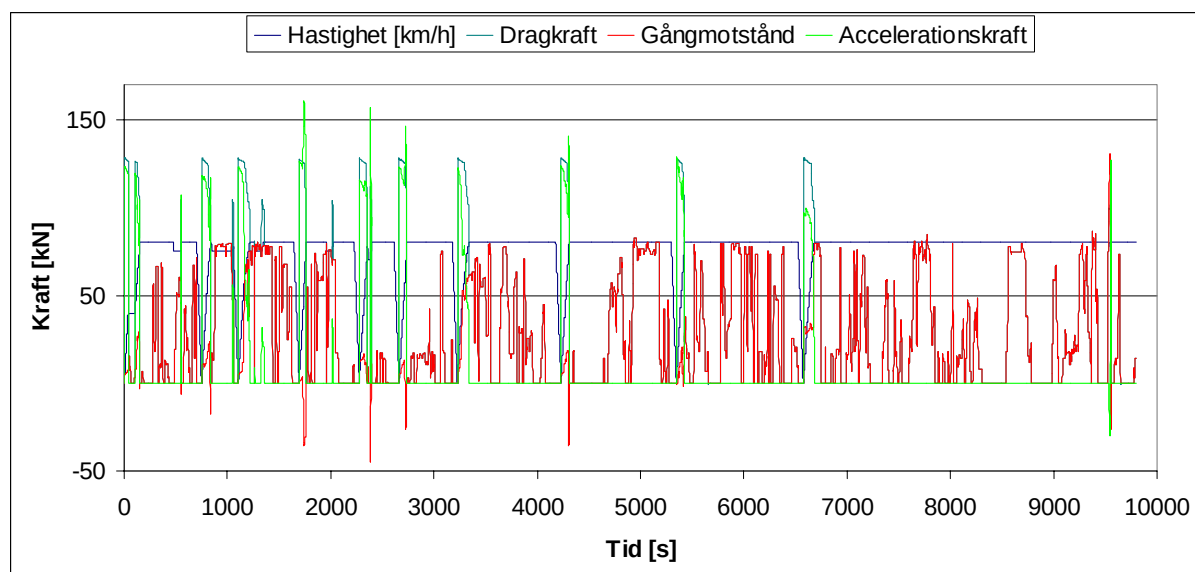
I Figur 7-4 varierar spänningen mellan 16,5 kV och 11,9 kV. Dragkraftsbristen har blivit mycket starkare och tåget försenas 7,9 %.

Rc4 har egentligen en bashastighet på ca 80 km/h men vid 38 km/h ligger en kraftig motorströmsbegränsning, därför får den hastigheten ersätta bashastigheten. Diagrammen visar att vid 16,5 kV är accelerationskraften F_a aldrig negativ vid hastigheter upp till ca 38 km/h. När spänningen blir dålig blir även accelerationskraften F_a negativ fastän tåget har en lägre hastighet än 38 km/h.



Figur 7-5. Rc4, 378 ton, 16,5 kV

Tittar man i stället på ett lätt tåg, Figur 7-6, ser man att tåget aldrig tappat fart och vid acceleration är krafterna som står till förfogande för accelerationen höga. I detta fall är gångmotståndet också ofta negativt, men då tåget mest rullar eller bromsar med dragkraften $F \leq 0$ finns inte data för beräkning av gångmotståndet eftersom det är beräknat med hjälp av dragkraft och acceleration⁷⁰.



Figur 7-6. Rc4, 378 ton, 12 kV

⁷⁰ Se appendix för mer information.

I Figur 7-6 har spänningen sänkts till 12 kV, en spänning som påverkar lokets dragkraftskurva starkt, minskar kraften som står till förfogande för acceleration, dvs. accelerationen blir lägre, men fortfarande fås aldrig brist på dragkraft, utom i ett fall där gångmotståndet kortvarigt är mycket högt, vid ca 9500 sekunder.

Värderingsmetoden har nackdelen att det i många sammanhang är helt normalt att dragkraften inte räcker i högre hastigheter. För ett tungt resandetåg med största tillåtna hastigheten 160 km/h kommer dragkraftsbristen också att bli stor i höga hastigheter. Samtidigt får man dock god information om vilka tåg som befinner sig i farozonen för att bli påverkade av låg spänning och vilka som troligtvis inte påverkas alls.

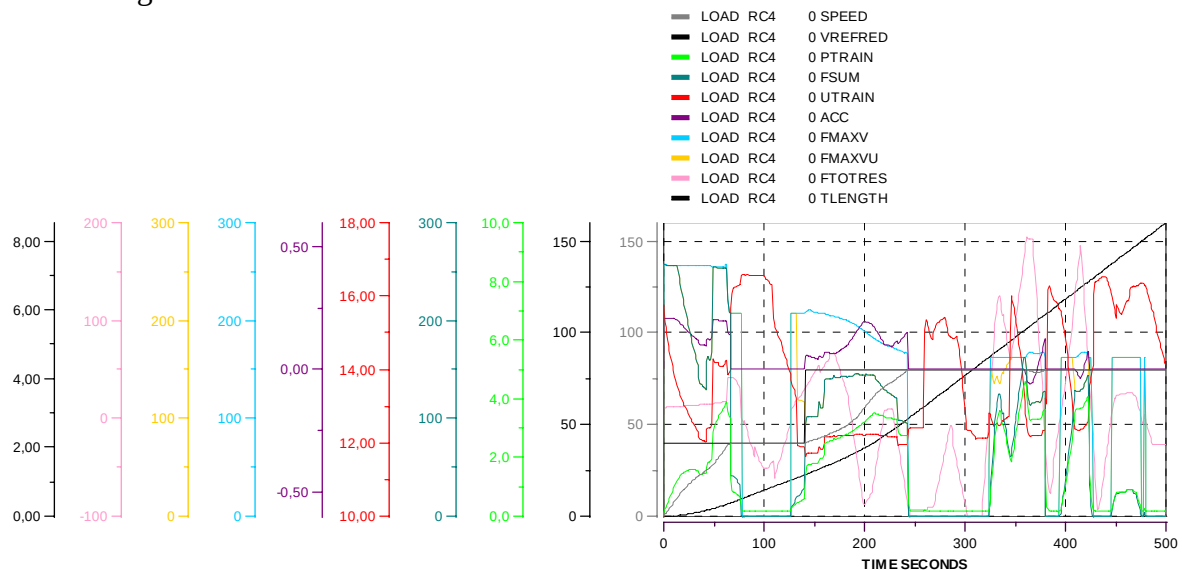
Om man i stället skulle ha tillgång till data för att beräkna både belastningsgraden och accelerationsmarginalen vid 15 kV och verklig spänning skulle man för alla situationer se hur stor marginal man har.

7.8 Grafisk presentation av tidigare beskrivna variabler med data från Tracfeed

7.8.1 Utdata från Tracfeed

Den grafiska presentationen av krafterna i avsnitt 7.7 är ofullständig eftersom Tracfeed inte gav tillräcklig utdata för beräkningen. Därför har tre nya variabler införts i Tracfeed:

- F_U maximal kraft med hänsyn till hastighet och spänning F_{maxvu}
- F_{15} maximal kraft endast med hänsyn till hastigheten F_{maxv}
- Gångmotståndet D F_{totres}



Figur 7-7. Graf från Tracfeed: Rc4 tågvtikt 1078 ton, dålig spänning

Figur 7-7 visar utdata från Tracfeed med de införda variablerna. Exemplet är samma som har använts tidigare, Rc4, tågvtikt 1078 ton, på sträckan Långsele – Vännäs. De första 500 sekunderna av körningen visas.

Ovanstående graf är resultatet från Tracfeed. Krafterna beräknas i varje simuleringssteg, först beräknas vilken kraft som tåget skulle behöva, vad som finns tillgängligt och vad kraften begränsas av⁷¹. Fördelen är att beräkning av dessa variabler inte kräver fler beräkningssteg eftersom de redan finns. Av den anledningen går variablerna också att få för varje tidssteg

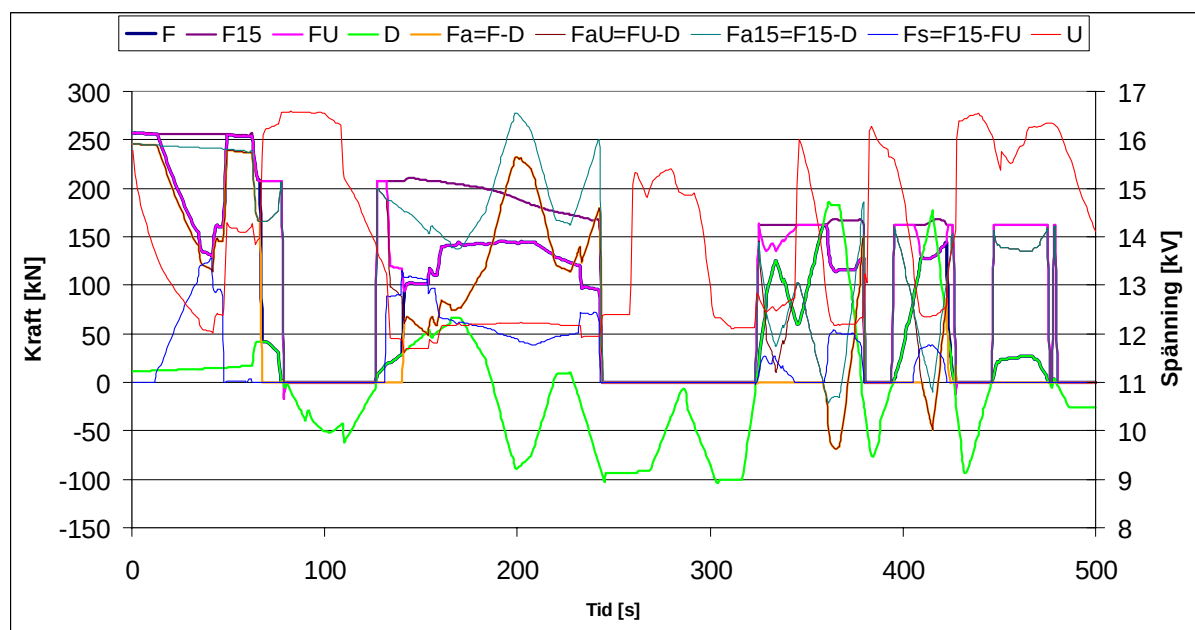
⁷¹ TracFeed Simulation, User's Manual, Swedish edition. Avsnitt 3.2.11, sid 14 utgåva N, 091026.

eller punkt utmed sträckan när man använder sträckan som oberoende variabel. I det fallet räknas tiden om till sträcka. Tracfeed använder bara tid.

En begränsning med F_{maxvu} är att det är den kraften som skulle vara tillgänglig vid rådande spänning men om den kraften skulle tas ut skulle givetvis effekten öka och spänningen därmed sjunka och kraften därför bli lägre. F_{maxvu} förutsätter alltså att spänningen inte ändras. Så är det naturligtvis inte utan F_{maxvu} kommer inte att kunna finnas tillgänglig utan den verkliga högsta dragkraften med hänsyn till spänningen kommer att ligga någonstans emellan F_{sum} och F_{maxvu} utom i det fallet då F_{sum} är lika med F_{maxvu} . Att beräkna det verkliga F_{maxvu} kräver två parallella simuleringar och därigenom dubblad simuleringstid vilket inte är önskvärt. Måtten som bygger på F_{maxvu} utnyttjar dock huvudsakligen frågan om det finns en marginal mellan lokets nuvarande belastning och det som kraftförsörjningen kan ge och om marginalen är stor eller liten. Det svaret kan man fortfarande svara på och även i vilken storleksordning det kommer att vara. Man kommer dock inte att kunna se värdena som annat än en grov uppskattning.

Vid tolkningen av figurerna är det dock viktigt att notera att det inte bara är tåget som sänker sin egen spänning utan i första hand är det annan trafik som sänker spänningen för det studerade tåget. Av den anledningen går det inte att säga hur spänningen skulle se ut om F_{maxv} togs ut.

7.8.2 Belastningsgrad och accelerationsmarginal, absoluta värden



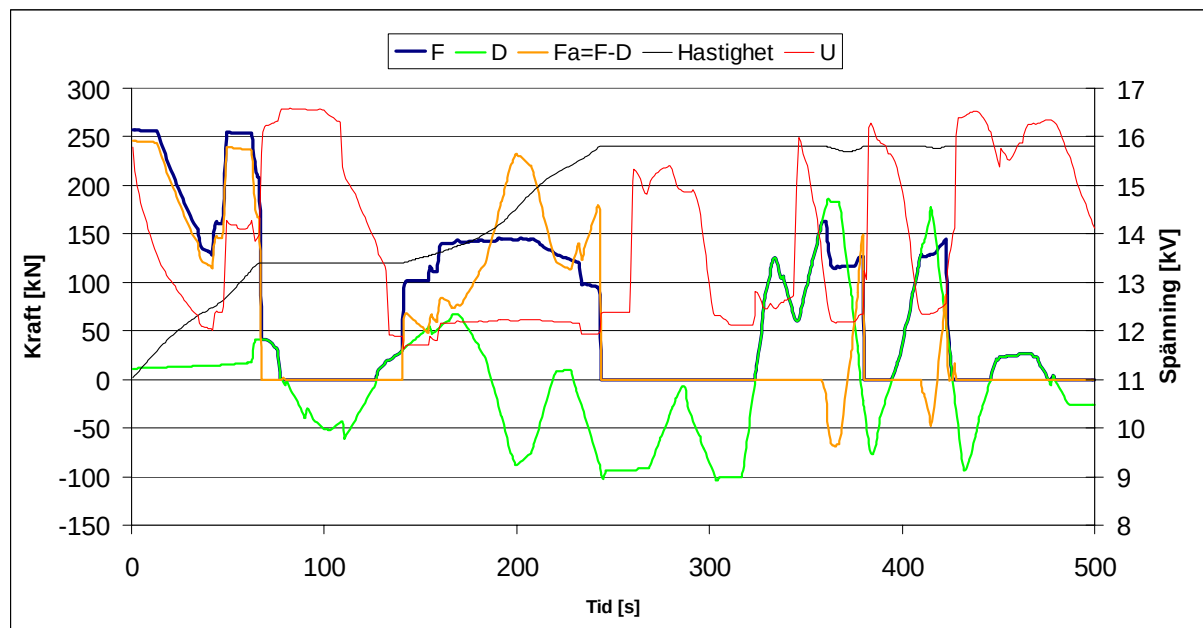
Figur 7-8. Accelerationskrafter

I Tracfeed beräknas endast dragkraft och därmed traktionseffekt när behov av sådan föreligger. Det innebär att det inte, utan större programförändringar, går att få fram dragkraft endast som funktion av hastigheten och dragkraft som funktion av spänning och hastighet för de perioder då tåget rullar. Värdena för dessa avsnitt är 0 i Figur 7-8 ovan. Kännedom om gångmotståndet finns dock alltid. För de manuellt beräknade värdena har heller ingen beräkning utförts för sträckor där tåget rullar eller bromsar då det skulle ge missvisande resultat. Spänningen vid lokets strömavtagare är också inritad.

För ett lok med återmatande elbroms blir F_{maxv} och F_{maxvu} negativa och visar den maximala elektriska bromskraften beroende av spänning och hastighet. Detta är dock inte av

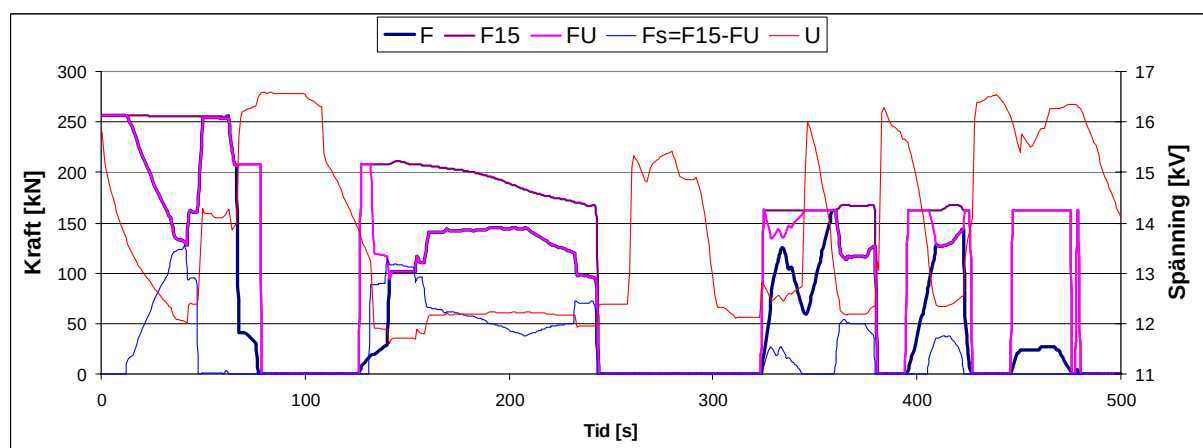
intresse. Då samtliga beräkningar nedan är gjorda med Rc4 som inte har elbroms påverkar detta inte. Om så vore, skulle dessa värden ha exkluderats.

För att förtydliga bryts Figur 7-8 upp i delar:



Figur 7-9. Gångmotstånd och dragkraft för ett tåg

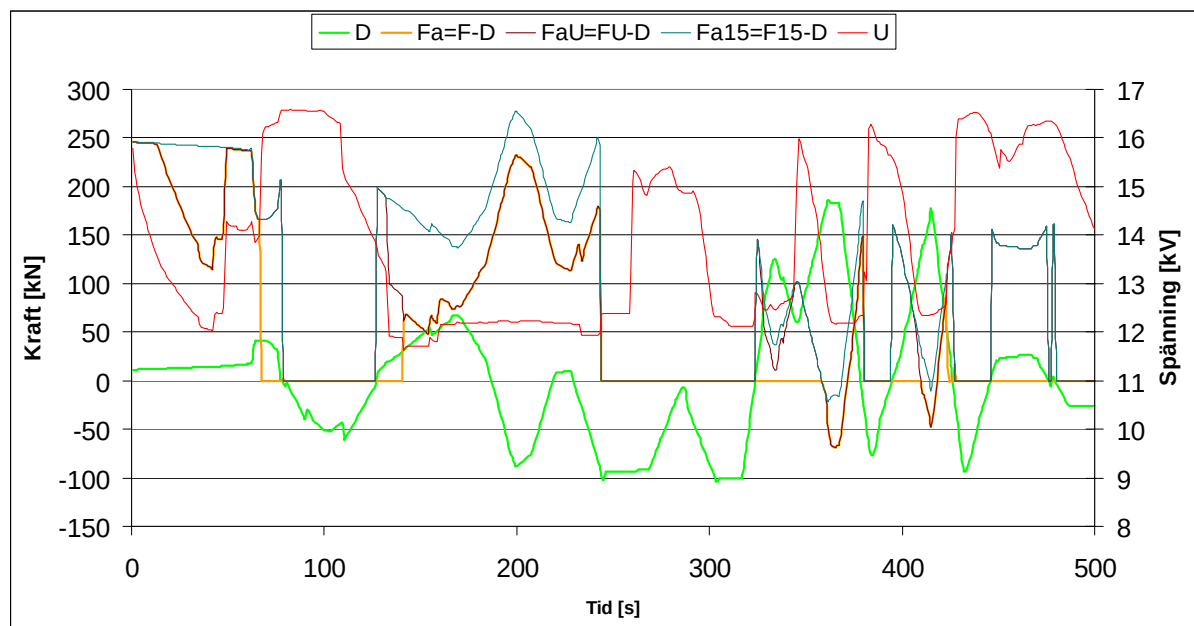
Figur 7-9 visar dragkraften F , gångmotståndet D samt accelerationskraften F_a , kraften som används för acceleration. Kraften som används för acceleration är differensen mellan lokets aktuella dragkraft och gångmotståndet. När gångmotståndet är negativt, vilket innebär att tåget befinner sig i en utförsbacke, ökar således accelerationen utan att dragkraften ökar. Vid cirka 370 s och 430 s är gångmotståndet högre än dragkraften, accelerationskraften blir negativ och tåget kan inte hålla hastigheten.



Figur 7-10. Maximala dragkrafter enligt dragkraftskurvan för ett tåg

I Figur 7-10 visas bara dragkrafterna, den momentana dragkraften F , den maximalt möjliga dragkraften med hänsyn till spänning och hastighet F_U samt dragkraften opåverkad av spänningen, F_{15} . Vidare visas skillnadskraften, alltså hur mycket den tillgängliga kraften minskar på grund av den lägre spänningen. Det är dock bara i vissa sammanhang som kraften skulle utnyttjas, vid exempelvis 330 s – 350 s utnyttjar loket inte tillgänglig dragkraft, fastän den är begränsad av den lägre spänningen. Detta motsvarar fall C, avsnitt 7.6.3. Här ser man tydligt att den låga spänningen i detta fall inte är resultatet av det studerade tågets effektbehov

utan att spänningen sjunker på grund av annan trafik och som följd av detta minskar dragkraften.



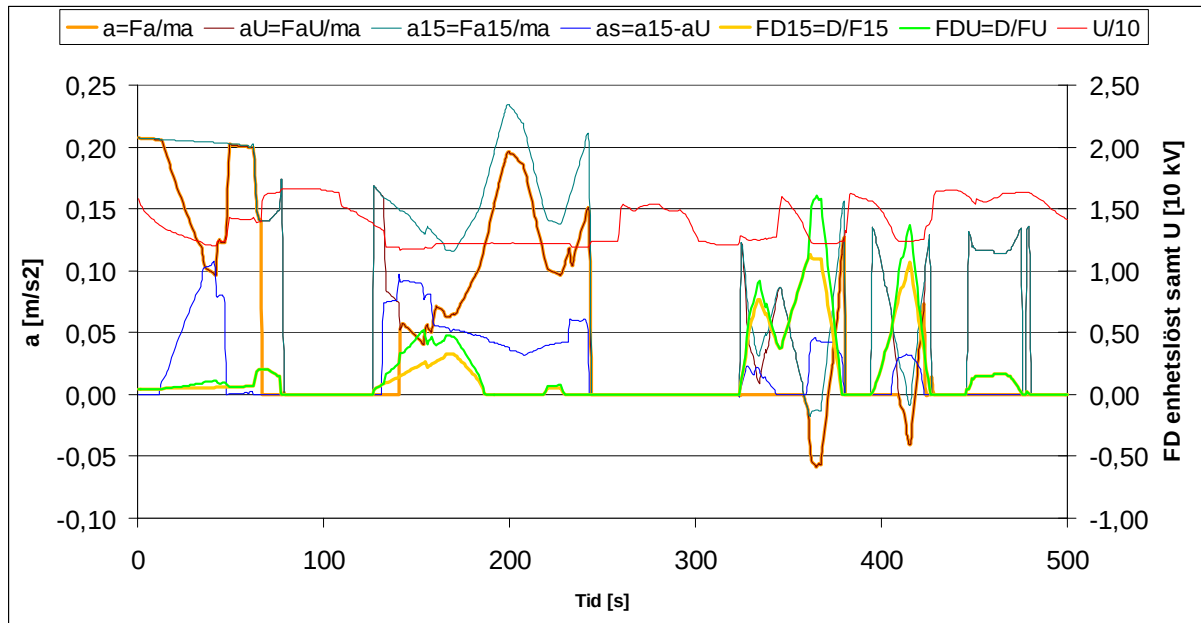
Figur 7-11. Krafter som står till förfogande för acceleration

Krafterna i Figur 7-11 står till förfogande för acceleration. Det är de tillgängliga krafterna i föregående diagram minus gångmotståndet. Så länge krafterna är positiva kan tåget accelerera. F_a sammanfaller nästan alltid med F_{aU} , utom i vissa avsnitt vid 330 s – 480 s sekunder där tåget endast håller konstant hastighet. Där syns också att tåget, även vid en ideal spänning, inte kan hålla hastigheten, F_{a15} är negativ. Den lägre spänningen förstärker effekten.

7.8.3 Belastningsgrad och accelerationsmarginal, relativa värden

Nackdelen med krafter är att de inte är jämförbara mellan olika tåg. För att göra en jämförelse möjlig måste krafterna viktas, i Figur 7-12 nedan är krafterna dividerade med tågets dynamiska massa, på det sättet skapas fiktiva accelerationer.

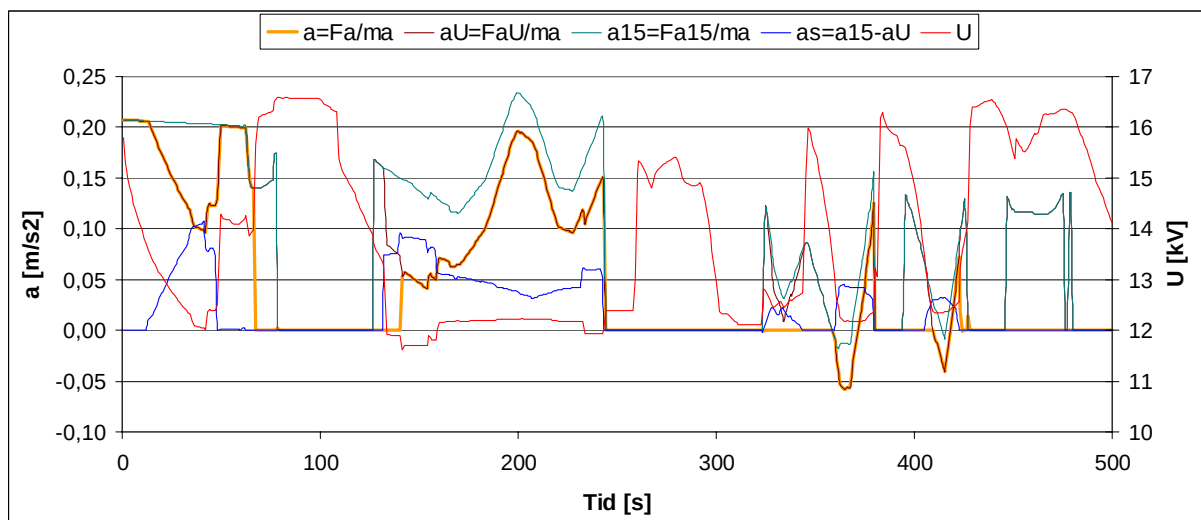
Likasa kan dragkraften divideras med gångmotståndet, även detta ger ett värde, belastningsgraden, som är jämförbar mellan olika tåg.



Figur 7-12. Relativa mått på ett loks belastning

Observera att spänningen är ritad i tiotals kilovolt i Figur 7-12 ovan.

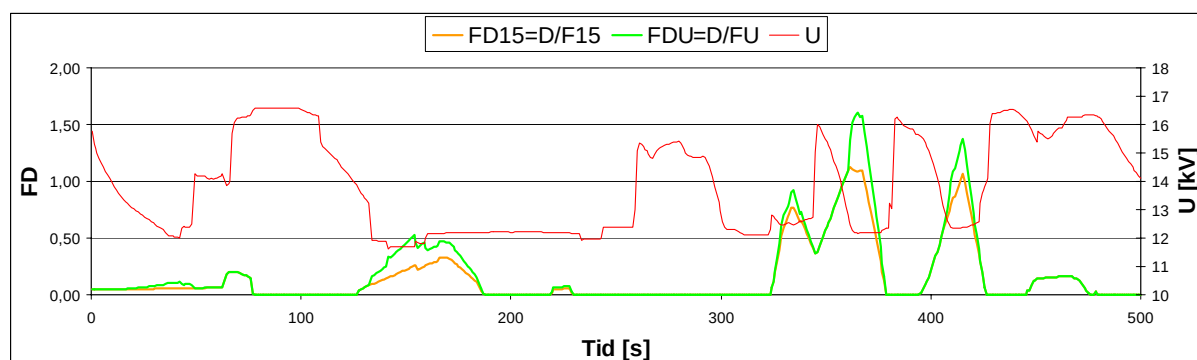
För tydlighetens skull delas diagrammet upp i flera diagram.



Figur 7-13. Fiktiva accelerationer

Figur 7-13 visar de tidigare införda krafterna dividerade med tågets dynamiska massa. a är tågets acceleration, a_u är accelerationen med vilken tåget skulle kunna accelerera vid rådande spänning och a_{15} är accelerationen med vilken tåget skulle kunna accelerera vid en ideal kraftförsörjning. a_s är $a_{15} - a_u$, dvs. skillnaden mellan de maximalt tillgängliga accelerationerna. Detta är även ekvivalent med

$$a_s = \frac{F_s}{m_a} = \frac{F_{15} - F_U}{m_a} = a_{15} - a_U$$



Figur 7-14. Belastningsgraden

I Figur 7-14 visas belastningsgraden som är ett värderingsmått som är oberoende av accelerationerna. Så länge belastningsgraden är 1 eller lägre kan tåget hålla hastigheten. Ju lägre den är desto större acceleration är möjlig. Ökande hastighet och lägre spänning ökar belastningsgraden längs tågets körsträcka.

I Figur 7-12. *Relativa mått på ett loks belastning* kan man se hur belastningsgraden och accelerationsmarginalen samvarierar.

8 Utvärderingskriterier

8.1 Allmänna krav på utvärderingskriterier

I kapitel 6 har olika simuleringar genomförts där sambandet mellan försening och spänning studerats. Det har konstaterats att spänning visserligen kan vara ett ensamt mått på kraftförsörjningssystemets styrka och att en hög spänning säkert inte påverkar trafiken negativt men att detta inte automatiskt ger vare sig en god trafik eller ett optimalt dimensionerat kraftförsörjningssystem.

Den enklaste lösningen är att kräva att spänningen aldrig får sjunka under exempelvis 14,25 kV mer än 30 sekunder per timme, vilket motsvarar ca. 1 % av tiden. 14,25 kV är spänningen där nästan alla lok utvecklar full prestanda eller bara begränsas marginellt. Att, vilket är vanligt, använda ett dygn som begränsningsperiod ger helt missvisande resultat. Om spänningen är 11 kV i 15 minuter kan detta påverka tågtrafiken extremt och ge förseningar på åtskilliga procent men vid 30 sekunder per timme kan man vara rätt säker på att påverkan på ett tåg alltid kommer att vara mindre än 1 % av körtiden. Då kan man i princip också avstå från en minimigräns för spänningen under dessa 30 sekunder.

Men syftet är inte att ställa ett för högt krav, utan att ha ett mått som kan visa systemets kapacitet så att man därefter kan bestämma hur systemet ska vara dimensionerat. Eftersom tågtrafiken är det centrala i verksamheten är det också rimligt att kravet på en strömförsörjning i grunden ska utgå från körtiderna och förseningarna. Å andra sidan finns det situationer då en enkel schablonmässig värdering av spänningen behövs för att sedan bedöma om noggrannare utredningar är nödvändiga.

Samtidigt är det inte optimalt att vid simuleringar identifiera enstaka tåg som är kraftigt försenade och sedan öka kraftförsörjningssystemets prestanda tills dessa tåg är i rätt tid utan, som diskuterat i kapitel 7, kan tågets dragkraft i sig vara så underdimensionerad att det inte är lämpligt att kraftförsörjningssystemet förväntas kompensera för detta. Eftersom det inte bara är tåget själv som sänker sin egen spänning utan även annan trafik, kommer ett lok med måttligt högre effekt, för att få högre dragkraft, att ställa lägre krav på den något svaga kraftförsörjningen än ett lok med lägre effekt men med samma tågvikt vars prestanda begränsas så mycket av en låg spänning att det påverkar körtiderna starkt. Dock gäller detta bara inom rimliga gränser, är matningen allt för svag kommer ett högre effektuttag påverka spänningen för mycket. Detta förutsätter att effekten finns tillgänglig och att systemet klarar strömuttaget men bara inte kan hålla spänningen. I många situationer försenas dock trafiken utan att lokets effektuttag är maximalt utan tidigare eftersom dragkraften minskar. Konsekvenserna av underdimensionerade lok förstärks av Rc-lokens dragkraftsbegränsning.

Vad gäller mer synliga parametrar i infrastrukturen görs denna värdering självklart. Ett tåg som är längre än mötesstationerna ges lägre prioritet för att det stjälar kapacitet från banan. Ett tåg som vid ideal spänning inte ens klarar stigningar i rimlig hastighet, kommer att ifrågasättas vid kapacitetstilldelningen och måste köras med två lok. Givetvis kan det vara berättigat att bygga en mycket stark kraftförsörjning som inte påverkar de sämst dimensionerade tågen men då ska det vara ett medvetet beslut och inte en följd av bristande kännedom om begränsande faktorer.

Av denna anledning är det i princip tre faktorer som man önskar att värdera

- Lokets prestanda i förhållande till belastningen
- Procentuell försening gentemot ideal kraftförsörjning
- Spänningen

Utvärderingskriterierna kan även vara olika beroende på i vilket sammanhang de ska användas eftersom man har tillgång till olika data och är intresserad av olika svar. Därför är det lämpligt att göra en indelning i olika situationer. I grunden utgår man ifrån simuleringen där man har tillgång till all data och möjlighet att använda ostörd trafik eller annan prestanda som referens. I resterande situationer minskar sedan tillgången till data och man kommer att vara tvungen att ersätta eller försumma viss indata.

Med hjälp av detta ska sedan nedanstående frågor kunna besvaras:

- Påverkar kraftförsörjningen körtiderna?
- Hur stor är belastningen på kraftförsörjningsanläggningen? Finns överkapacitet?
- När och var måste nätet förstärkas? På vilket sätt?
- Finns möjligheten att köra tyngre tåg med högre effekt?
- När kraftförsörjningen påverkar körtiderna negativt: är det för att kraftförsörjningsanläggningen är för svag eller är det för att dragkraften är för klen dimensionerad?

Avsnittet tar först upp tänkbara situationer i vilka utvärderingskriterierna ska användas. Därefter diskuteras kriterierna med hjälp av tidigare framtagna modeller. Sedan beskrivs hur dessa kan användas i de olika utvärderingssituationerna. Till sist ges förslag på möjliga krav som kan ställas – hittills har huvudsakligen verktygen diskuterats men inte mål i absoluta tal.

8.2 Utvärderingssituationer

Man kan framförallt identifiera tre olika scenarier där utvärderingskriterierna ska användas.

- Utgångspunkten för utvärderingen är simuleringsresultat. En sträcka, ett nät eller en viss trafik simuleras med ett visst resultat. Kriteriet ska ge svar på varför tågen är försenade och om kraftförsörjningsanläggningen behöver åtgärdas eller om det finns marginal och hur stor denna är.
- Analys av existerande sträcka med verklig trafik. Påverkas tågen negativt av dålig spänning? När är kapaciteten fullgod, när utnyttjad och när överskriden.
- Prognosverktyg. Går det att köra en viss tillfällig trafik? Hur mycket kommer den att påverkas och påverka annan trafik?

8.2.1 Utvärdering av simuleringsresultat

När en kraftförsörjningsanläggning studeras kan trafik till exempel simuleras med Simpow/Tracfeed. Programmet ger mycket utdata som dock på något sätt måste värderas för att kunna fastställa eventuella brister.

Vid tillgång till ett simuleringsprogram är fördelen att det är enkelt att använda flera storheter än bara spänningen i utvärderingen. Vidare är det möjligt att använda ostörda simuleringar som referens och på så sätt använda viktade värden.

8.2.2 Mätningar

Det behövs ett mått för att kunna bedöma kapaciteten av kraftförsörjningsanläggningen genom att värdera uppmätta data. Det behövs både för att bedöma hela nätet och för att bedöma hur enstaka tåg påverkas. Det är önskvärt att också kunna kvantifiera över- eller underkapaciteten. Vid mätningar har man inte tillgång till ostörda referensvärden, därför behövs ett mått för att kunna värdera endast mätbara storheter.

8.2.2.1 Ombord på ett dragfordon

Då man endast önskar information om hur ett enstaka tåg påverkas kan kravet mycket väl vara specifikt för just detta tåg med avseende på fordonstyp, vikt och sträcka. Det är också sannolikt att det måste vara så då skillnaderna i påverkan på olika tåg är för stora och man också måste kunna värdera om det bara är kraftförsörjningen som har brister eller om också dragkraftens prestanda är för låg. Måttet ska kunna ge en prognos om hur mycket körtiden skulle kortas vid bättre strömförsörjning

8.2.2.2 I en punkt i anläggningen

När spänningar och strömmar mäts i exempelvis matningsstationer eller kopplingscentraler behövs också ett rent spänningsmått för att kunna göra en grov värdering av resultaten. I detta fall är ett särskilt tåg inte känt utan man mäter ström och spänning och kan sedan till exempel anta att strömmen härrör från en punktlast mitt emellan två matningsstationer och med hjälp av linjens impedans beräkna spänningen vid punktlasten. Detta sätt att räkna identifierar sämsta tänkbara resultat. Att klumpa ihop alla belastningar till en punktlast är inte alltid rimligt.

Beroende på vilket värde som önskas måste man identifiera olika typtåg och en typisk sträcka och sedan identifiera vilken spänning som ger maximal godtagbar försening. Man kan också välja den tågsammansättning och den sträcka där påverkan är högst. Men då överdimensionerar man nätet grovt utan att ha en aning om hur mycket eftersom det inte är rimligt att anta till exempel ett 1000 tons tåg med ett R_c i 20 promilles stigningar för alla sträckor. Man kan dock inte undvika att det blir ett mycket trubbigt verktyg som bör användas med försiktighet.

8.2.3 Prognosverktyg

Det är önskvärt att ha ett enkelt verktyg för att kunna bedöma om man kan tillåta till exempel provtåg med en vikt eller effekt överstigande det normala. Exempelvis ett tåg med 3 R_c och 3300 ton i stället för 2 R_c och 2200 ton. Verktöget behöver inte kunna ge mer information än om det går att köra tåget eller om det kommer att hindra annan trafik genom att antingen störa kraftförsörjningen eller genom att spänningen blir så låg att tågets hastighet blir för låg.

Detta förutsätter att det finns ett mått som hjälpligt går att överföra från en situation till en annan. Eftersom dock spänningen är väldigt beroende av hur trafiken i övrigt ser ut, till exempel var tåg möts och om två tåg accelererar exakt samtidigt eller med några sekunders förskjutning. Vidare är, som tidigare konstaterat, sambandet mellan spänning och körtid ringa. En möjlighet är att i förväg ha simulerat "stresstest" med tung eller tät trafik, exempelvis fordonskolonner, för alla sträckor och med hjälp av dessa framställa kriterier för vad som är möjligt. Dessa kriterier kan sedan användas av operativ personal för att snabbt kunna göra en bedömning.

8.3 Utvärderingskriterier

Utvärderingskriterierna kan delas in i tre delar som kan användas var för sig eller tillsammans beroende på i vilket sammanhang de ska användas:

- Prestandaparametrar för tåg
- Förlängning av körtiden
- Spänningsnivå

8.3.1 Utvärderingsperiodens längd

Samtliga kriterier kan nyttjas över olika långa sträckor, antingen räknat i tid eller i kilometer. Att titta på momentanvärden är ointressant då de inte påverkar trafiken. Av den anledningen är också en mycket låg spänning i några sekunder ointressant annat än att den sannolikt visar att något utnyttjas i mycket hög grad. Tracfeed ger resultat med bråkdelar av sekunder när någonting förändras snabbt. De i denna rapport använda simuleringarna har annars tidssteg på typiskt 1-2 sekunder. Några flytande medelvärden över lite längre avsnitt har inte beräknats. Ett rimligt minsta tidssteg är en period som är tillräckligt kort för att inte ha någon signifikant påverkan på trafiken. I kraftsystemsammanhang förekommer en och två minuts medelvärden, detta är dock för långt. Ett tåg som kör i 120 km/h tillryggalägger 2 km på en minut eller 33 m på en sekund. Om tåglängden är 600 m behöver tåget ca 20 sekunder för att passera. Många godståg är dock långsammare och andra tåg kortare samtidigt som effektvariationerna går mycket fort. Därför borde ett 5 s medelvärde för utdata vara rimligt. Vid acceleration är dock förloppen betydligt snabbare än så, däremot är det data som antagligen inte behövs annat än i beräkningarna men inte för utvärderingen.

Ur ett kundperspektiv, där kunden är intresserad av att tåget ska ankomma till slutstationen enligt tidtabell, är hela tågfärden en rimlig längd på utvärderingsperioden. Men för exempelvis en stålpendel Luleå - Borlänge innebär det att mer än halva Sveriges längd beräknas in i värdet under en tidsperiod som är över ett halvt dygn. Det finns också nattåg som kör ännu längre sträckor utan att byta tågnummer.

Å andra sidan får perioden inte vara så kort att den kan råka innehålla en del av en sträcka som ger en oönskad påverkan på resultatet. Det finns branta stigningar som är åtskilliga km långa. Ett kort avsnitt kan komma att inbegripa endast en sådan stigning, endera när tåget kör uppför eller utför. För ett tåg som har uppehåll för trafikutbyte på mellanstationer, vare sig det är för resande eller gods, är dessa ankomsttider också relevanta. Dessutom är det ur ett produktionsperspektiv viktigt eftersom exempelvis möten på en enkelspårig sträcka måste fungera. Därmed är den kortaste relevanta sträckan den mellan två hållplatser, i första hand mötesplatser.

För utvärderingskriterierna är därmed längden av en utvärderingsperiod lämpligen en kombination av sträckan mellan två driftplatser med uppehåll samt hela tågfärden. I vissa fall är avståndet mellan två närliggande uppehåll så kort att det inte ger någon vettig bedömningsmöjlighet. Då kan andra lämpliga längder väljas. Av den anledningen kan det vara av intresse att kunna förse driftplatser i Tracfeed med "flaggor" mellan vilka prestandaparametrar ska beräknas.

8.3.2 Prestandaparametrar för tåg

8.3.2.1 Prestandavärdering

Prestandaparametrar för tåg syftar till att systematiskt värdera ett tågs prestanda för att därur kunna bedöma om tågets försening endast beror på den dåliga spänningen eller också på att dragkraften är för svag. Ett tåg som är mycket känsligt för låga spänningar skall alltså synas men inte per automatik vara kraftförsörjningssystemets dimensionerande tåg. I en simulering med verklig tidtabell där det visar sig att tåget är försenat kan det också vara så att tidtabellen är för snäv.

Prestandaparametrarna kan antingen användas för sig eller i kombination med övriga kriterier. De kan delas upp i två kategorier, de som bara värderar tåget och de som kombinerar belastningen av dragfordonet med en spänning.

En möjlig stegvis värdering är:

1. titta på förseningen hög; nästa steg
2. titta på lokets prestanda bra; nästa steg, dålig; öka prestandan, ignorera tåget eller nästa steg,
3. titta på spänningen Öka spänningen. (Torde vara under 14 kV eller lägre)

Som prestandaparametrar har två olika mått utvecklats, belastningsgraden och accelerationsmarginalen.

Belastningsgraden visar hur stor andel av lokets totala dragkraft som åtgår för att hålla en konstant hastighet.

$$FD = \frac{D}{F} \quad [\text{enhetslös}]$$

Accelerationsmarginalen visar hur mycket kraft som finns tillgänglig utöver den som åtgår för att hålla hastigheten konstant, dvs. hur hög acceleration som är möjlig i varje ögonblick.

$$a_U = \frac{F_a}{m_a} = \frac{F - D}{m_a} \quad [\text{m/s}^2]$$

8.3.2.2 Kategorisering av tåg

Tågen kan kategoriseras efter hur mycket dragkraft som finns till förfogande.

A-tåg belastningsgrad under 0,7 50 % av tiden och aldrig över 1

B-tåg belastningsgrad över 1 max 5 % av tiden

C-tåg belastningsgrad över 1 mer än 5 % av tiden

Värdena är fiktiva. För att ha riktiga siffror behövs det dels ett krav om vad som önskas av infrastrukturen och därutöver simuleringar för att se vilka procentuella värden som motsvarar detta. Dock måste observeras att det ofta är planerat och normalt att belastningsgraden är över ett i hastigheter över bashastigheten.

Tanken är att om ett A-tåg försenas av spänningen är spänningen dålig, försenas ett C-tåg är tåget för tungt i första hand.

8.3.2.3 Belastningsgraden

Den i avsnitt 7.3.2 definierade belastningsgraden visar hur stor andel av lokets totala dragkraft som åtgår för att hålla en konstant hastighet vid ideal spänning

$$FD_{15} = \frac{D}{F_{15}}$$

och vid verklig spänning.

$$FD_U = \frac{D}{F_U}$$

Genom att subtrahera dessa båda

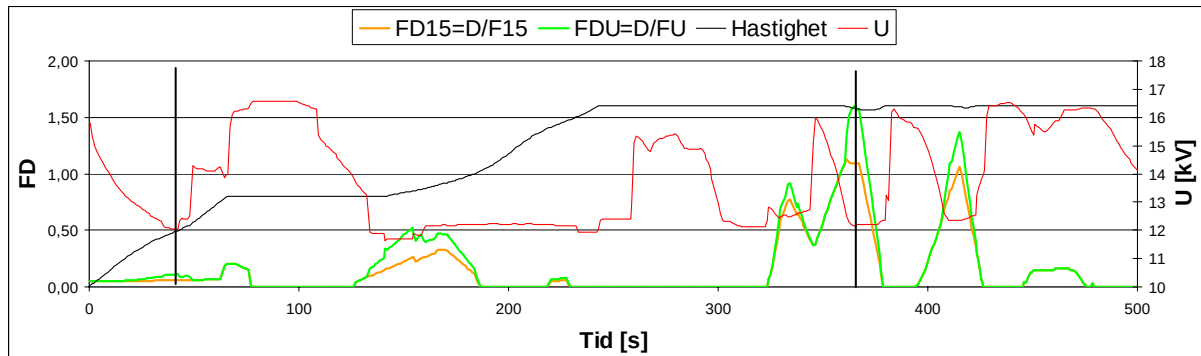
$$FD_U - FD_{15} = \frac{D}{F_{15}} - \frac{D}{F_U}$$

kan man få den absoluta påverkan som den lägre spänningen ger. Den absoluta påverkan ger ett mått där påverkan är liten när belastningsgraden är låg, dvs. vid acceleration i låga hastigheter och där tåget håller konstant hastighet med litet pådrag.

Väljer man i stället att dividera belastningsgraderna får man den relativa påverkan.

$$\frac{FD_U}{FD_{15}} = \frac{\frac{D}{F_U}}{\frac{D}{F_{15}}} = \frac{F_{15}}{F_U}$$

Denna kommer i stället att ge stort genomslag vid låga belastningsgrader.



Figur 8-1. Belastningsgraden

I Figur 8-1 visas belastningsgraderna, spänningen och hastigheten (vänstra skalan, 1 motsvarar 50 km/h). Vid till exempel 42 sekunder befinner sig tåget i acceleration från 0. Hastigheten liksom gångmotståndet är låga, $FD_{15}=0,06$ och $FD_U=0,11$ vilket ger att

$$FD_U - FD_{15} = 0,06$$

och

$$FD_U / FD_{15} = 1,99$$

Vid 365 sekunder är $FD_{15}=1,09$ och $FD_U=1,61$, förhållandet mellan belastningsgraderna blir därmed:

$$FD_U - FD_{15} = 0,52$$

och

$$FD_U / FD_{15} = 1,47$$

Detta visar att om man vill visa spänningens påverkan på ett tåg där acceleration är viktigt är den relativa skillnaden mellan belastningsgraderna intressant. Ska i stället förmågan att hålla hastigheten få genomslag är den absoluta skillnaden av intresse. Den relativa skillnaden kommer också att ge en fördel för tåg som har prestandamarginaler. Däremot kommer den absoluta skillnaden mellan belastningsgraderna att vara mycket högre för tåg där belastningen vid god spänning redan är nära 1, dvs. för ett tungt tåg eller för ett tåg som kör i sådana hastigheter att det planerligt tappar fart i stigningar.

I stället för punktvis undersökning bör dessa också undersökas över längre utvärderingsperioder. En metod är att beräkna genomsnittet, medianvärden eller undersöka under hur lång tid värdet är över en viss nivå. För detta krävs dock bättre kunskap om vad som önskas värderas och vilka egenskaper för ett tåg som ska premieras och vilka som ska "bestraffas".

Vid medelvärdesberäkning är det alltid viktigt att ha klart för sig om det är relevant. Ett vettigt medelvärde förutsätter att högre värden kan kompensera för sämre värden men i dessa sammanhang finns i regel ett värde som ger märkprestanda och värden över det bidrar inte

mera så man måste identifiera maximalvärdet. Det finns också situationer där en lägre belastningsgrad inte ger en ytterligare positiv påverkan då till exempel accelerationen inte kan bli oändligt hög och tåget inte kan köra fortare än en viss högsta hastighet.

I fallet ovan är genomsnittet av alla $FD_U=0,35$ och alla $FD_{15}=0,28$ så genomsnittet

$$FD_U - FD_{15} = 0,07$$

och

$$FD_U / FD_{15} = 1,27$$

Perioder med belastningsgrad 0, dvs. då gångmotståndet är negativt, tåget rullar eller bromsar, är exkluderade.

8.3.2.4 Accelerationsmarginal

I avsnitt 7.3.1 definierades accelerationsmarginalen. Den visar hur mycket kraft som finns tillgänglig utöver den som åtgår för att hålla konstant hastighet, dvs. hur hög acceleration som är möjlig i varje ögonblick vid ideal spänning

$$a_{15} = \frac{F_{a15}}{m_a} = \frac{F_{15} - D}{m_a}$$

och vid verklig spänning

$$a_U = \frac{F_{aU}}{m_a} = \frac{F_U - D}{m_a}$$

eftersom accelerationen är

$$a = \frac{F_a}{m_a} = \frac{F - D}{m_a}$$

Liksom för belastningsgraden kan dessa subtraheras

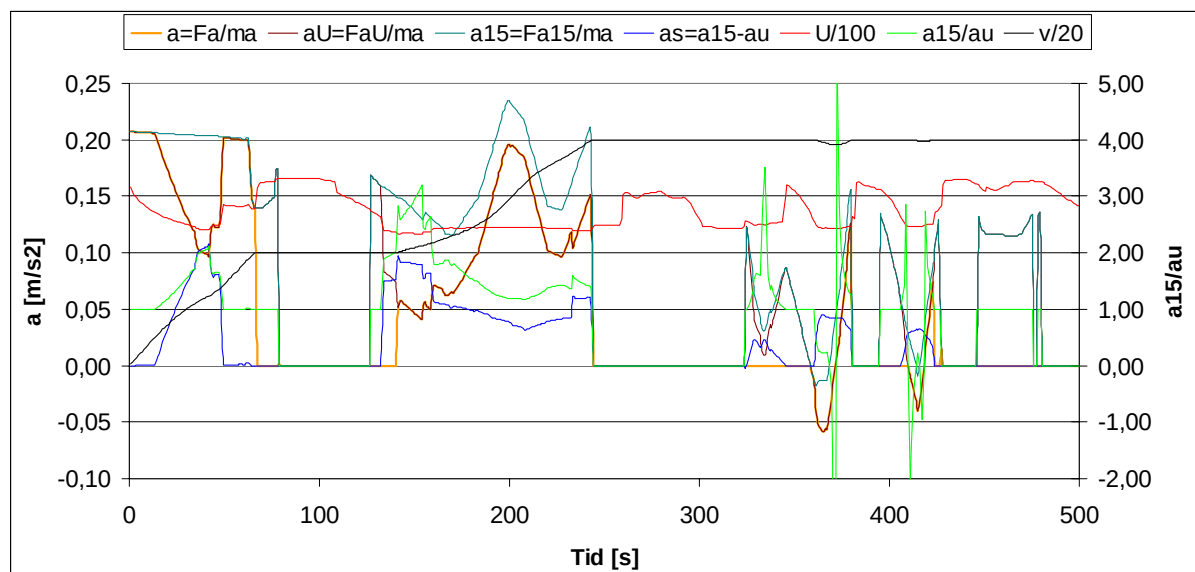
$$a_s = |a_{15} - a_U| = \frac{F_s}{m_a} = \frac{|F_{a15} - F_{aU}|}{m_a} = \frac{|F_{15} - F_U|}{m_a}$$

för att få den absoluta påverkan som den lägre spänningen ger. Beloppstecknen behövs i det fallet som F_{15} och därmed a_{15} är negativa.

Accelerationsmarginalerna kan även divideras

$$\frac{a_{15}}{a_U} = \frac{F_{a15}}{F_{aU}} = \frac{F_{15} - D}{F_U - D}$$

för den relativa påverkan.



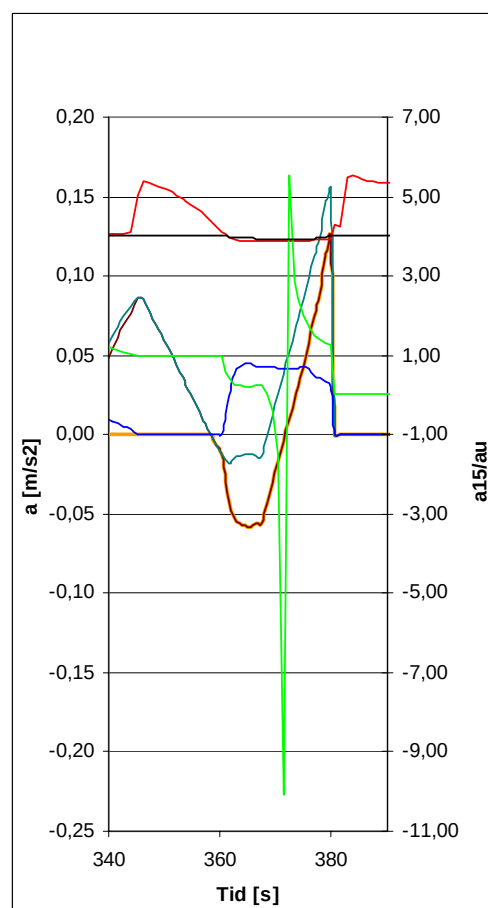
Figur 8-2. Accelerationsmarginaler och skillnader i accelerationsmarginalen

I Figur 8-2 är spänningen ritad som $[kV]/100$ på den vänstra axeln och hastigheten som $[km/h]/20$ på den högra axeln. a_{15}/a_u ger extrema värden när accelerationerna skiftar från negativt till positivt och omvänt. I Figur 8-3 visas ett utdrag ur Figur 8-2. I Tabell 8-1 visas värdena för krafterna vid 370-372 sekunder:

Tabell 8-1. Värden i figur 8 2

Tid [s]	F_{aU}	F_{a15}	F_s	a_{15}/a_U
370	-20,12	29,81	49,87	-1,48
371	-4,49	45,37	49,86	-10,10
372	11,04	60,89	49,91	5,52

När både F_{aU} och F_{a15} är negativa fås ett värde mellan 0 och 1, i det fallet är inversen av resultatet det relevanta. En enkel tillyxning av resultatet är att värden över 1 behandlas som de är, värden mellan och -1 och 1 inverteras och från alla värden mindre än 0 tas beloppet. Detta skapar dock extrema värden när F_{aU} är nära 0. Beroende på vad man ska ha resultatet till är det eventuellt lämpligare att addera en konstant till alla värden mellan 1 och -1. Värdet 1 innebär att spänningen inte påverkar dragfordonet, 0 att det inte finns data, vilket innebär att spänningen inte spelar någon roll för att tåget rullar eller bromsar.



Figur 8-3. 340-390 s

Om man definierar accelerationsmarginalens negativa del, accelerationsbristen, med egna beteckningar kan man värdera överskott och brister var för sig. Detta är en fördel eftersom en accelerationsmarginal inte kan jämna ut en accelerationsbrist. Med dessa har man möjligheten att skapa t.ex. ett genomsnitt av alla accelerationsbrister med vissa villkor, till exempel att brister över bashastigheten viktas lägre.

8.3.3 Förlängning av körtiden

Förlängningen av körtiden, dvs. hur mycket ett tåg försenas i förhållande till ett tåg med ideal spänning är i grunden det som är mest intressant.

Fördelar

- Enkelt att beräkna vid simulering. Varje tåg simuleras dels med verklig spänning och med 15 kV konstant spänning vid strömvtagaren som referens och programmet beräknar tidsavvikelsen för vald sträcka.
- Man relaterar inte till någon absolut tid utan studerar bara den relativa påverkan av strömförsörjningen. På så sätt är förfarandet robustare mot fel i indata då både referensen och verkliga tåget har samma fel.
- Oberoende av en tidtabell – som är en konstruktion som tar hänsyn till många faktorer man inte vill ha med i en utvärdering, till exempel kända svagheter i strömförsörjningen.

Nackdelar

- Det går inte att identifiera vilka marginaler som finns i kraftförsörjningen
- Ett tungt tåg reagerar starkare på en dålig kraftförsörjning än ett lätt tåg men kraftförsörjningen ska inte överdimensioneras bara för att operatörerna ska kunna köra med för svaga lok.
- Svårt att identifiera genom mätningar då man endast har tillgång till sådant som kan mätas på en, eventuellt försenad, tågfärd. För detta behövs andra mått, t.ex. ett spänningsvärde. Vidare kan också tidtabellen vara för snävt lagd av olika anledningar.

I många fall kan också simulering mot en tidtabell vara av intresse då tåget kanske inte behöver utnyttja full prestanda för att ligga i fas med övrig trafik. Även i en situation där man vill se hur väl en tänkt trafikering fungerar är det av intresse att se förseningarna mot tidtabellen då tåget visserligen kan köra långsammare än vid ideal spänning men inte påverkas så mycket att det inte längre kan hålla tidtabellen.

När man jämför verkliga tåg med tidtabeller är antagligen den mest rimliga utvärderingen att man mäter förseningen mellan varje tidpunkt där tåget har en fast tid som är viktigt ur tågföringsperspektiv, dvs. att ett möte störs om tiden inte hålls eller att bakomliggande tåg blir sent respektive att ankomsten till slutstation försenas. Därefter presenteras förseningarna både för varje avsnitt och för hela sträckan. Detta eftersom en försening på 0,5 % på en hel sträcka kan antas vara godtagbart men i denna försening kan det rymmas att tåget kommer 5 minuter för sent till ett tågmöte – vilket ger kraftiga följdförseningar. Därav uppkommer också att presentation av förseningen i absoluta tal är viktigt.

8.3.4 Spänningsmått

Vanligtvis har man bedömt järnvägens kraftförsörjning genom att ange att spänningen ska ligga inom ett visst intervall. För att förfina metoden har till exempel en spänningsnivå angetts och därtill hur lång tid denna nivå får understigas helt oberoende av trafik eller belastning. Fördelen är att det är intuitivt och enkelt men som visat är sambandet mellan endast spänning och möjligheten till att utföra önskad trafik så ringa att detta krav bara är användbart för grova överslagsberäkningar. $U_{\text{mean useful}}$ förfinar spänningsmåttet men är som visat snarast ännu sämre än en lagom hög, fix, spänningsnivå.

Ett bättre spänningsmått får, till skillnad från $U_{\text{mean useful}}$, inte medelvärdesbilda upp till maximal spänning eftersom en spänning över det lägsta värde vid vilken ett lok levererar full

prestanda inte kan kompensera för lägre spänningar. Värden högre än denna spänning är bara det användbara spänningsfallet som elleverantören har till sitt förfogande för att kunna överföra önskad effekt till loket. Vidare är det rimligt att bara beakta spänningen vid strömavtagaren när loket förbrukar traktionseffekt, dvs. när dragkraften $F > 0$. Detta är också relativt enkelt att mäta genom mätning av den aktiva effekten eller genom pådragets läge.

Fördelar

- Lätt att mäta
- Vedertaget
- Enkelt att använda

Nackdelar

- Spänningen säger mycket lite om möjligheten att bedriva trafik
- Det finns ingen gemensam lägsta spänning vid vilka lok utvecklar full prestanda
- Spänningen ger ingen information om lokets prestanda räcker till för tåget

Som synes är ett rent spänningsmått mycket enkelt att mäta och intuitivt hanterbart men säger lite utan fordonsspecifika krav. Därmed förutsätter alla spänningsmått som ska användas för förseningsbedömning för ett tåg att man definierar en lägsta spänning vid vilket loket kan leverera full effekt. Fortfarande kommer dock en spänning under denna att påverka körtiden helt olika beroende på lokets belastningsgrad.

8.3.4.1 Olika metoder för att beräkna ett spänningsmått

Eftersom en fix spänningsnivå som lägsta-krav är ett alldeles för trubbigt verktyg behövs det ett genomsnitt- eller spridningsmått för att förbättra kriteriet och om möjligt inkludera tillgänglig dragkraftsmarginal för acceleration. Beroende på i vilket sammanhang måttet ska användas är det också tänkbart att använda olika beskrivningar av spänningen beroende på användningsområde. En spänning som relaterar till lägsta spänning vid vilket loket ger full prestanda är inte ett lämpligt mått vid bedömningen av blandad trafik. Samtidigt består där möjligheten att titta på dimensionerande tåg och använda ett mått som är optimerat för dragkraften i just det tåget.

Ett spänningsmått behöver inte "förbjuda" för låga spänningar då en låg spänning under en mycket kort tid inte behöver ha någon nämnvärd påverkan på trafiken. Det är bättre om kravet kan ta hänsyn till den låga spänningens påverkan och värdera denna på rätt sätt. Minimi- och maximinivåer är stipulerade i normer med hänsyn till vad loken ska klara utan att ta skada.

Det finns ett flertal olika sätt att beskriva en spänning. Samtliga gäller bara för en loktyp och tar inte hänsyn till lokets belastningsgrad.

8.3.4.2 Ett bättre alternativ till $U_{\text{mean useful}}$

Om man utgår från $U_{\text{mean useful}}$ men försöker åtgärda dess tillkortakommanden är det närliggande att definiera ett medelvärde (eller annat värde) där alla spänningar över ett visst värde behandlas som ett konstant värde. Detta då en högre spänning aldrig kan kompensera för en lägre spänning utan antingen är spänningen tillräckligt bra för att loket ska kunna tillhandahålla full effekt eller så begränsar spänningen effekten. Om man antar att 14,25 kV skulle vara lägsta godtagbara spänning skulle medelvärdet bildas av att alla spänningar över 14,25 kV räknas som 14,25 kV och alla lägre spänningar som dess verkliga värde ned. Detta mått kan säga om något är acceptabelt eller inte, men inte ge någon information om hur mycket marginal som finns för mer trafik eller mer belastning om medelvärdet skulle vara lika med 14,25 kV.

I Tabell 8-2 används samma simulering som för exemplet Långsele-Vännäs. Tåget är som tidigare en Rc4, 1078 ton tågvikt som körs på samma sträcka men med varierande annan trafik för att få olika spänningar. U_m beräknas som $U_{\text{mean useful}}$ men alla värden över 13,5 kV räknas som 13,5 kV då detta – i den använda modellen – är lägsta spänningen vid vilken ett Rc levererar full prestanda. Samma beräkning har också gjorts för 14,25 kV, ett värde som skulle passa till fler loktyper.

Tabell 8-2. Försening vid olika spänningsvärden

Försening	$U_{\text{mean useful}}$	$U_{m\ 14,25}$	$U_{m\ 13,5}$
0,0 % ⁷²	13,50 kV	13,50	13,50
0,6 %	14,96 kV	13,99	13,40
2,5 %	14,55 kV	13,74	13,24
7,9 %	14,49 kV	13,70	13,22
9,9 %	14,28 kV	13,60	13,16
13,9 %	14,56 kV	13,70	13,20
33,6 % ⁷³	13,76 kV	13,30	12,98

För 13,5 kV blir korrelationen mellan försening och spänning relativt god, för 14,25 kV något sämre men fortfarande bättre än $U_{\text{mean useful}}$. Dock finns ingen möjlighet att se vilka marginaler som står till förfogande. Vidare är det svårt att ur en för låg spänning dra slutsatser om hur stor förseningen blir.

Eftersom kravet för $U_{\text{mean useful}}$ på en konventionell sträcka är minst 13,5 kV är alltså samtliga dessa spänningar godkända enligt normen och indikerar till och med en mycket stark matning, fastän förseningen är oacceptabelt hög utom i de första 2-3 fallen. I sista fallet, 33,6 % försening är spänningen under 12 kV i totalt 7 minuter, något som inte är godkänt enligt normerna.

8.3.4.3 Användbart spänningsfall

Det användbara spänningsfallet är den spänning som kraftleverantören har till förfogande för att kunna tillhandahålla önskad effekt. Den lägsta spänning vid vilken loken levererar full prestanda subtraheras från alla spänningar. Därefter bildas medelvärdet av alla positiva spänningar som blir det användbara spänningsfallet och medelvärdet av alla negativa spänningar som visar bristen. Spänningarna måste tidsviktas eller kompletteras med ett tidsmått så att de kan jämföras. Medelvärdet av den positiva och den negativa spänningen får inte bildas, eftersom man då återigen jämnar ut två spänningar som inte kan jämnas ut varandra. Detta mått ger både information om systemets marginal och dess brist.

8.3.4.4 Tidsviktad varaktighetskurva

En tidsviktad varaktighetskurva⁷⁴ är inget kvalitetskrav utan endast ett verktyg för att visualisera spänningens utseende. Med dess hjälp kan man enkelt se hur lång tid spänningen befinner sig över, under eller på en viss nivå beroende på hur man väljer att rita kurvan. Till exempel kan man rita in spänningen och normens tidskrav på lägsta-spänningar i en kurva och då direkt se med hur god marginal man klarar normen. Det blir också lätt att se hur stora andelarna av de olika spänningsnivåerna är, något som ett medelvärde inte ger information som. I sig säger dock kurvan inget om spänningens kvalitet.

⁷² Vid konstant spänning.

⁷³ Om man kortvarigt tillåter spänningar under 12 kV, som tillåtet enligt EN 50163 vid störningar, i detta fall totalt 7 minuter vid knappt 4 tim körtid ($U=11,68-12$ kV) ökar förseningarna kraftigt fastän $U_{\text{mean useful}}$ fortfarande är godkänt.

⁷⁴ Hofmann, Gerhard, mfl, 1997.

Tittar man på spänningsfördelningen, i till exempel en punkt, är det ett bra sätt för att visualisera spänningens kvalité där över kanske ett dygn. För en tågfärd är det mindre intressant då spänningen huvudsakligen är intressant tillsammans med platsens beskaffenhet, dvs. om tåget behöver den spänningsnivån just i den punkten.

8.3.5 Övriga, förkastade mått

En idé har varit att definiera en saknad spänning upp till full prestanda vilket går ut på att man formulerar en spänningsdifferens mellan verklig spänning och spänningen som skulle behövas för att loket uppnår den prestanda som behövs för tillfället. Problemet med ett sådant kriterium är att det är mycket svårt att fastställa vilken prestanda loket skulle behöva. Idén kan också lämpa sig i diskussionen kring accelerationsmarginalen men saknad prestanda är i det enkla fallet oändlig eller åtminstone full effekt då maximal acceleration behövs för att komma upp i den högre hastigheten. Alternativet är att man undersöker vilken dragkraft loket skulle ha i exakt denna punkt vid en simulering med ideal spänning. Detta är dock simuleringstekniskt svårt att realisera då man måste tillordna varje punkt två simuleringar.

Det har också funderats på idéer att till exempel låta tåget redovisa vilken effekt det skulle behöva för att kunna leverera den prestandan som behövs och vilken spänning som skulle behövas till detta. En annan tanke var att jämföra hastigheter, punkt för punkt, mellan trafik vid ideal spänning och verklig spänning. Idéerna har förkastats antingen för att de är svåra att realisera, nyttan är oklar eller för att det skulle kräva dubbla simuleringar. Detta bör undvikas så långt som möjligt då simuleringstiderna för hela system är längre än den verkliga tiden. Dubbla simuleringar tar därmed orimligt lång tid samtidigt som implementeringen blir tidskrävande och komplicerad. De långa simuleringstiderna är dock i första hand ett problem vid simuleringar med Tracfeed.

Genom att skapa en ”upplevd spänning” skulle man kunna få ett mått där man inte ser verkliga spänningen utan en spänning som visar hur mycket tåget påverkas. Det skulle innebära att man viktar spänningen med t.ex. differensen mellan belastningsgraderna. Nackdelen är att man inte längre ser varför tåget blir sent och inte heller vet vad den verkliga spänningen är. Det är därför mycket bättre att titta på spänningen och förseningen samt belastningen i stället för att baka ihop allt till ett tal.

8.4 Implementering

Kriterierna kan användas i första hand vid simulering och vid mätning. Nedan ges några förslag till hur de kan implementeras i ett simuleringsprogram och hur de kan användas vid mätningar.

8.4.1 Simulering

Vid simulering finns tillgång till all data och även ideal spänning som referens. Samtidigt är det av intresse att simuleringar med fullständig indata, däribland kraftförsörjningssystemet, begränsas, för att inte förlänga simuleringstiden. Vid referenssimuleringar med ideal spänning behövs inget kraftförsörjningssystem. Övriga värden som maximalt tillgänglig kraft beräknas ändå i varje simuleringsteg och förlänger därför inte simulationstiden.

I första hand ska de tidigare föreslagna parametrarna finnas som utdatavariabler. Därvid måste beaktas att division med noll eller allt för små tal inte förekommer.

Vidare ska det finnas en möjlighet att jämföra varje tåg med sitt referenståg vid ideal spänning. Utvärderingssträckorna ska dels vara hela sträckan men också enligt tidigare föreslagna avstånd. Utöver det bör det finnas en möjlighet att sätta ”flaggor” i till exempel tidtabellen eller i filen som beskriver sträckan för att själv kunna välja utvärderingsintervall.

Förseningen ska anges som förlängningen av körtiden i procent samt i sekunder. Det ska också finnas möjligheten att se förseningen i en hel zon eller på en sträcka för alla tåg.

När resultatet av en simulering inom ett område presenteras som en grafisk tidtabell är det önskvärt att grafen för varje tåg kan ha olika färg beroende på tågets egenskaper. Om tåget exempelvis är mer än ett visst antal procent försenat färgas grafen röd på det avsnittet. Vill man i stället se belastningsgraderna färgas graferna olika beroende på hur starkt belastat tåget är. På så sätt blir det enkelt att se inom vilket område tåg försenas och av vilken anledning. Likaså bör man kunna välja om graferna ska färgas beroende på spänningen. Förbehållet är dock att variationerna går mycket snabbt, ibland kan bara några hundra meter förändra ett värde från att vara ”bra” (grönt) till att vara ”dåligt” (rött).

När viktningen och jämförelsen mellan belastningsmått är mer utarbetad kan det också vara lämpligt att ändra färg beroende på värdet på dessa. Man kan också överlagra en simulering vid ideal spänning med en simulering med verklig spänning.

8.4.2 Mätning

Vid mätningar har man i regel svårt att få referensvärden utan man kan endast värdera det som går att mäta ombord på det tåget där mätningen sker. Detta gör att kriterierna får förenklas avsevärt. Mätningen är också olika beroende på om man mäter på ett tåg eller i en punkt på banan. I det förstnämnda fallet har man tillgång till alla parametrar som rör det tåget medan man i andra fallet egentligen bara har en spänning.

Vid mätning ombord på ett tåg är tillgängliga mått i första hand spänning samt även dragkraft, acceleration och hastighet. Gångmotståndet kan man räkna ut med hjälp av accelerationen och dragkraften. Därmed finns möjligheten att beräkna belastningsgraden.

Genom att man vet hur fordonstypen påverkas av en låg spänning finns möjligheten att uppskatta hur mycket detta tåg påverkas av spänningen genom att mäta denna och undersöka var den sjunker till de spänningsnivåerna där den påverkar prestandan negativt. Eftersom man har tillgång till spänningen och gångmotståndet har man tillräcklig data för att, med hjälp av den matematiska modell av loket som finns i Tracfeed, beräkna samtliga variabler som också finns tillgängliga vid simulering. Detta förutsätter dock att modellerna stämmer överens med verkligheten.

Spänningen är enkel att mäta, dragkraften låter sig enklast beräknas ur motorns aktiva effekt som kan beräknas ur spänning, ström och fasvinkel. Därtill behövs verkningsgraden. Dragkraften låter sig också mätas vid kopplet men det fordrar mer komplicerad utrustning, dock blir resultatet noggrannare. Accelerationen kan mätas med en accelerometer eller, sannolikt enklast, en GPS som visar acceleration.

Vid mätning på en punkt i sträckan har man inte tillgång till mer än spänning samt ström och fasvinkel. Således kan man dra slutsatser om den aktiva och reaktiva effekten som passerar den punkt där man mäter. Detta medför att man måste dra slutsatser om matningens kvalitet bara genom att bedöma en spänning, till exempel genom att beräkna det tidigare föreslagna medelvärdet.

8.5 Krav

I rapporten har olika verktyg presenterats för att utvärdera kraftförsörjningen. Dock har absoluta siffror undvikits så långt som möjligt och endast förslag getts. Detta av två anledningar; dels är syftet att finna generella kriterier utan att ställa krav men problemet är också att det inte finns klara krav på vad kraftförsörjningens och tågen måste prestera.

Nedan ges något mer systematiskt exempel på värden för några möjliga krav. Utgångspunkten är att kraftförsörjningen endast får påverka trafiken i ringa omfattning. I avsnitt 3.3 skrevs att man vid tidtabellsplaneringen gör ett gångtidstillägg på 3 % samt 4 minuter per 200 km körsträcka. Tanken är inte att dessa tillägg är till för kraftförsörjningen då tidtabellsplaneringen förutsätter en ideal matning. Dock kan man exempelvis anta att kraftförsörjningen får försena ett tåg maximalt 1 % av körtiden vid ideal spänning. Därmed har man också skapat ett förseningsmått. Ur detta kan man sedan räkna fram övriga mått.

I avsnitt 8.1 nämndes konstanta spänningen med ett visst underskridande som enklaste spänningskrav. Konstaterandet där var att om 14,25 kV är den lägsta spänning som inte reducerar dragfordonens prestanda och man accepterar en procents försening får spänningen sjunka under detta värde maximalt en procent av tiden. Då påverkan på ett tåg ska förbli ringa måste begränsningsperioden vara hyfsat kort, exempelvis en timme. Därmed är en stark matning en matning där spänningen inte sjunker under 14,25 kV mer än 30 sekunder per timme. I praktiken är kravet högt. Med simuleringar skulle man eventuellt kunna visa att det kan utökas till 30 sekunder varje halvtimme.

Ett absolut krav för $U_{\text{mean useful}}$ är som visat i 8.3.4.2 är meningslöst men man kan ställa ett absolut krav för t.ex. $U_{m14,25}$. Så länge man bara stöder sig på simuleringar med Rc-lok ligger det kring 13,8 kV. Dock krävs simuleringar med fler fordonstyper och på fler sträckor för att skapa ett mer universellt krav.

Lokprestandan, där accelerationsmarginalen beskrevs i avsnitt 7.4 och belastningsgraden i avsnitt 7.5 är svårare att kvantifiera utan kännedom om krav. Då även dessa mått till stor del är på idéstadiet kommenteras endast belastningsgraden. Där är framförallt två kriterier närliggande. Det ena, låga kravet, är att ett tåg måste kunna starta även i den brantaste stigningen på sträckan (här bortses från att det åtgår extra kraft utöver gångmotståndet för igångsättningen). Detta skulle innebära att belastningsgraden vid ideal spänning FD_{15} måste vara mindre än 1 vid stillestånd. Detta krav är dock mycket lägre än den önskade jämviktshastigheten i starkaste stigningen på ca 40 km/h omnämnd i avsnitt 3.3. Det motsvarar snarare att $FD_{15} < 1$ vid lokets bashastighet, dvs. belastningsgraden måste vara mindre än 1 så länge lokets dragkraft är förhållandevis konstant. Rc4 har ett hack i dragkraftskurvan strax under 40 km/h som får ersätta bashastigheten. Man kan också ställa ett krav på hur stor del av tiden belastningsgraden får vara över 1.

Den enklaste värderingen som inbegriper både tid, spänning och prestanda föreslogs i avsnitt 8.3.2.2, kategorisering av tåg. Nedan ges ett annat exempel på kategoriseringen.

A-tåg	belastningsgrad under 0,5 vid bashastighet i sträckans dimensionerande stigning
B-tåg	belastningsgrad 0,5-0,75 vid bashastighet i sträckans dimensionerande stigning
C-tåg	belastningsgrad 0,75-1 vid bashastighet i sträckans dimensionerande stigning

Förseñas ett A-tåg är spänningen dålig, förseñas ett C-tåg är tåget för tungt i första hand.

Vid simulering på det sätt som görs med Tracfeed på Banverket i dagsläget är det enklaste dock att endast ställa ett förseningskrav eller till och med bara ett tidskrav gentemot tidtabell och beräkna även belastningsgraden för alla tåg. Om ett tåg utmärker sig genom att det är senare än andra utan att spänningen är särskilt dålig kommer man att kunna konstatera att belastningsgraden är hög och prova en ny simulering efter att man minskat detta tågs vikt eller bytt till ett starkare lok.

9 Slutsatser och förslag till fortsatt arbete

9.1 Slutsatser

För att utvärdera kraftförsörjningen behövs först konkreta krav på tåg och trafik, något som inte finns på det sättet idag. Att dimensionera lokets dragkraft med minsta möjliga marginal utifrån endast mekaniska egenskaper skapar ett system som är mycket känsligt för störningar och det kräver att kraftförsörjningen hanteras som ideal vilket man då också måste försöka uppnå. Detta är dyrt utan att ge mest trafik för pengarna. Därför behövs en samsyn om banans kapacitet där kraftförsörjningen och fordonsprestandan ingår som verkliga faktorer.

Det har visats att ett spänningsmedelvärde som $U_{\text{mean useful}}$ är ett olämpligt mått för att bedöma banmatningssystemets kapacitet eftersom olika tåg påverkas helt olika av en låg spänningsnivå. En låg spänning sänker ett loks effekt och därmed dragkraft medan en hög spänning inte kan öka dragkraften utöver lokets normala prestanda. På så sätt kan en låg spänning orsaka förseningar men en hög spänning kan inte minska redan existerande förseningar. Ett medelvärde över alla spänningar låter dock en hög spänning kompensera för en låg. Om däremot alla spänningar över en viss nivå, exempelvis 14,25 kV, räknas som 14,25 kV i genomsnittet kompenserar en hög spänning inte längre för en låg och därmed fås en mycket bättre korrelation mellan spänningsmedelvärdet och förseningen. Dock varierar den lägsta spänningen som inte påverkar lokets prestanda mellan olika loktyper vilket medför att det fortfarande inte går att få ett universellt mått.

Dessutom är känsligheten för en låg spänning väldigt beroende av både loktypen och lokets belastning men också exempelvis uppehållsmönstret. Därför kan man, utgående från spänningen, endast säga att en spänning över ett visst värde inte påverkar trafiken negativt. Att alltid kunna tillhandahålla denna höga spänning är dock ett krav som kostar mycket att genomföra men till en begränsad nytta.

I första hand är det intressant att se huruvida den tänkta trafiken påverkas av spänningen men det förutsätter tydliga krav på trafiken samt fordonens prestanda och belastning. Detta eftersom dragfordonets spänningskänslighet påverkas mycket starkt av hur stor belastningen är på fordonet, det vill säga hur stor del av fordonets totala dragkraft som behövs vid varje given tidpunkt. Det medför också att samma lok på olika sträckor eller med olika tunga tåg påverkas helt olika av samma spänning. I ett fall kan förseningen vara så liten att den inte märks medan den i det andra fallet är så hög att tåget i praktiken är omöjligt att köra på ett vettigt sätt fastän spänningen är densamma. Av den anledningen går det inte heller att ensamt fokusera på vilken försening den verkliga kraftförsörjningen förorsakar i relation till en ideal kraftförsörjning utan det behövs en helhetssyn på hela systemet där kraftmatningen ingår som en faktor.

När en banas kapacitet bedöms tar man självklart hänsyn till det mekaniska samspelet mellan fordonet och banan för att därur bedöma vilken trafik som är mest lämplig för att utnyttja banans kapacitet optimalt. Likaså görs dessa bedömningar för att se vilka investeringar i en sträcka som är samhällsekonomiskt lönsamma och vilka inte. Hittills har det dock i normalfallet förutsatts att kraftförsörjningen inte begränsar trafiken, utom på vissa sträckor där man, baserat på huvudsakligen erfarenhet, begränsat tågvikterna. I övriga fall har man åtgärdat kraftförsörjningen.

Att öka vissa tågs prestanda på grund av en svag matning är huvudsakligen meningsfullt på sträckor där kraftförsörjningen klarar av strömstyrkorna och att tillhandahålla effekten men spänningsfallet är för högt på grund av linjens impedans. Om då ett högre effektuttag vid lägre spänning möjliggörs genom att lokeffekten ökas kan det ge en totalt sett bättre trafik.

Det kommer dock att medföra ökade överföringsförluster. Det kan också medföra ökade problem med spänningsinstabilitet och effektpendlingar, något som inte berörts i detta arbete.

I framtiden bör kraftförsörjningen beaktas utifrån dess verkliga förutsättningar vid planeringen av trafiken, både rörande tågens prestanda och fördelningen av trafiken över dygnet då en samsyn rörande kapaciteten kan ge en totalt sett bättre anläggning till samma kostnad. För att kunna dra mer långtgående slutsatser krävs dock simuleringar på hela system för att se hur totala antalet förseningsminuter påverkas och vad som sker med nätets totala förluster samt även övriga effekter på nätet. På det enklare planet handlar det däremot om att den där extra vagnen på tåget kanske inte är det bästa i alla lägen fastän det skulle gå. Det beror dock också mycket på sträckans kapacitetsutnyttjande i övrigt.

Det bör också studeras mer ingående vilka effekter det skulle få att förändra strömbegränsningen enligt EN 50388 så att asynkronloken kan leverera full prestanda ned till 13,5 kV.

9.2 Förslag till fortsatt arbete

Uppgiften har visat sig vara mer omfattande och mångfacetterad än vad som ryms inom ett examensarbete.

Efter en diskussion om vilka krav som egentligen ställs på kraftsystemet och dragfordonens prestanda bör de uppställda kriterierna kvantifieras och verifieras med hjälp av simuleringar. Spänningsmåttan kan preciseras mycket mer genom att man, utgående från en tillåten försening, simulerar trafik under olika förutsättningar och undersöker ungefär vilken spänning som motsvarar en viss försening i sämsta fallet. På så sätt får man ett mått som kan användas för mätningar i anläggningen. Prestandaparametrarna är till stor del bara på idéstadiet och borde utvärderas mera. Eventuellt finns det andra kriterier som är mer användbara. Förhållandet mellan spänning, försening och lokens prestandaparametrar kan också undersökas noggrannare.

Arbetet har också varit relativt fokuserat på Rc-loken. Det vore av intresse att studera andra loktyper mera.

I arbetet har visserligen trafik med flera tåg simulerats, men det är alltid bara påverkan på ett tåg åt gången som har undersökts noggrannare. Det behövs fortsatta studier om hur totalkapaciteten påverkas i hela systemet när man tar mer hänsyn till tågens interaktion med kraftförsörjningsanläggningen. Vad skulle exempelvis ske om tågvikten på de mest belastade tågen minskades med 10 % eller dragkraften ökades och därmed både tågens hastighet ökade samt deras känslighet för låg spänning minskade. Hur skulle summan av förseningarna förändras? Vilka effekter skulle detta få för kraftförsörjningen? I simuleringarna i rapporten har aktiv samt reaktiv effekt och ström aldrig varit någon begränsning utan endast spänningen, i verkligheten finns fler faktorer att ta hänsyn till.

En annan aspekt som inte belysts alls är att man kan få dynamiska fenomen vid höga belastningar och snabba belastningsförändringar i svaga nät. Relevansen för detta problem bör undersökas noggrannare för att kunna bedöma om det begränsar möjligheten att öka belastningen i ett nät som har problem med spänningshållningen men tål de uppkommande strömmarna och kan tillhandahålla tillräckligt mycket aktiv och reaktiv effekt för att täcka effektbehovet.

Vidare saknas ett bra mått för att kunna uppskatta anläggningens kapacitet när man önskar att köra enstaka tunga tåg. Ett förslag är att man i förhand simulerar vissa höga belastningar och med resultaten skapar tabeller som beslutsstöd.

10 Källor

10.1 Tryckta källor

- Abrahamsson, Lars, *Railway Power Supply Models and Methods for Long-term Investment Analysis*, (Licentiate Thesis, KTH, School of Electrical Engineering, Electric Power Systems, Stockholm 2008)
- Aeberhard, Martin, Lörtscher, Manfred, *Nachweis der mittleren nutzbaren Spannung auf der NBS Mattstetten-Rothrist*, Elektrische Bahnen 1-2/2007, sid. 62-66.
- Banestrømforsyning, *Regler for prosjektering*, Jernbaneverket Infrastruktur, 2008.
- Biedermann, Niklas, *Banmatningssystem för höghastighetsjärnvägar*, (Examensarbete, KTH, Institutionen för tillämpad IT, Stockholm 2006).
- Danielsen, Steinar, *Vurdering av redundans- og dimensjoneringskriteriet for banestrømforsyning*, Jernbaneverket 2005
- Deutschmann, Peter, *Dokument 0042-64-Fordonsdatabas-v6*, Banverket XTBE 2009.
- Elektriska data för loktyperna Rc4 och Rc6*, Traintech, Solna 2004. (BV XTBE dok nr 0042-031).
- EN 50163:2004, *Railway applications – Supply voltages of traction systems*, CENELEC, Bryssel 2004
- EN 50388:2005, *Railway applications – Power supply and rolling stock – Technical criteria for the coordination between power supply (substation) and rolling stock to achieve interoperability*, CENELEC, Bryssel 2005
- Eriksson, Anders, Nilsson, Andreas, Snäll, Jan, *Åtgärdsplanering Kraftförsörjning, Förstärkningsåtgärder och kostnader för perioden 2010-2020*. LAKf 09-006, Banverket 2009.
- Fordonsbeskrivning X10*, ABB Traction AB, mars 1990.
- Friman, Edward, Kols, Håkan, *Allmän beskrivning av kraftförsörjningssystem för Järnvägen i Sverige*, EL-DOKUMENT EL 03-57 Rev B (Banverket 2005).
- Handhavande av dragfordon och manöverbagnar*, SJF 333, utg. 3, 791101.
- Hofmann, Gerhard, *Bewertung des Spannungsniveaus in AC-Bahnnetzen*, Elektrische Bahnen 102, 10/2004, sid. 420-425.
- Hofmann, Gerhard, Röhligh, Steffen, *Zeitgewichtete Belastungsdauerkurve bei elektrischen Bahnen*, Elektrische Bahnen 10/1997 sid. 272-279.
- Interoperability unit, Trans-European conventional rail system, subsystem Energy*. (IU-ENE-090120-TSI 3.0).
- Järnvägsnätsbeskrivning 2009, Banverket.
- Kalf, M., *Performance description BR185.2 Sweden and Norway*, Bombardier 2008-08-22.
- Linjebok BVF 646.7*, Driftledningsområde Ånge, utgåva 3, ätr 3, 091004.
- Lönard, Detlef, Northe, Jens, Wensky, Dorman, *Statische Bahnstromumrichter – Systemübersicht ausgeführter Anlagen* Elektrische Bahnen 93 (6/1995) sid. 179-190.
- Lukaszewicz, Piotr, *Running resistance of passenger and freight trains*, KTH 1995.
- Lundberg, Åke, *TF 601 Riktlinjer för tidtabellskonstruktion för tåg på statens spåranläggningar*, Banverket, 2000.
- Martinsen, Frank, *Simuleringsrapport, Hovedplan banestrømforsyning Ofotbanen, Revisjon*, Jernbaneverket ITPE september 2007.
- Östlund, Stefan, *Elektrisk Traktion*, (Järnvägsgruppen KTH, Institutionen för Elektrotekniska system, Stockholm 2005).
- Railway map of Sweden with power supply facilities*. Banverket 2005-10-01.
- Steimel, Andreas, *Elektrische Triebfahrzeuge und ihre Energieversorgung* (Oldenbourg Industrieverlag, München 2004).

Ström, Per, BVH 706, *Beräkningshandledning - Hjälpmedel för samhällsekonomiska bedömningar inom järnvägssektorn*, Banverket 2005
Tracfeed Simulation Reference manual, Balfour Beatty, (090612, revision L, J Stern).
Tracfeed Simulation Users manual, Swedish edition, Balfour Beatty, (090618, revision L, J Stern).
Trafikeringsavtal Green Cargo - Banverket för T09 (12 sidor).
 UIC Code 796 O, *Voltage at the Pantograph*, 1st edition, UIC, Paris 2000
 von Lingen, Jörg, Schmidt, Peter, *Bahnelektroenergieversorgung und Eisenbahnbetrieb*, Elektrische Bahnen 96 (1-2/1998) sid. 15-23.

10.2 Webbkällor

Avståndsberäkning (Avstånd mellan trafikplatser) <http://www.tydal.nu/php/tag/km.php> (090626)
 Gröna Tåget, *Nytt hastighetsrekord på svensk järnväg*, http://www.gronataget.se/templates/Page_____455.aspx (090915)

10.3 E-post eller muntliga källor

Abrahamsson, Lars, KTH, School of Electrical Engineering, Electric Power Systems (lars.abrahamsson@ee.kth.se) 2009.
 Friman, Edward, Banverket Borlänge. 2006.
 Jansson, Greger, Banverket Borlänge. 2006.
 Lundén, Håkan, Swetrack, Stockholm. Flera telefonsamtal, april 2010
 Meyer, Markus, Emkamatik GmbH (markus.meyer@emkamatik.com) 091119, 091202.
 Ruge, Armin, Banverket Sundbyberg, LPnKap. Samtal 090814.
 Wahlberg, Anders, Banverket Luleå. Gruppchef LAOpTs:Teknikstyrning, telefonsamtal 090817.

Appendix

Appendix A Dragkraftskurvor som funktion av spänningen

Dragkraftskurvorna är beräknade genom simuleringar med Tracfeed i olika spänningar.

Indata är lokmodellerna men med sänkt gångmotstånd för att kunna rita en kurva upp till sth med rimliga simuleringstider, annars blir accelerationstiden för lång eller gångmotståndet är för högt för att loket ens ska kunna komma upp i hastigheten. Samtidigt har testtågen gjorts relativt tunga då det är en accelerationsbegränsning inlagt i simuleringen. Denna skulle annars begränsa dragkraften vid låga hastigheter. De avbildade kurvorna är precis de som används vid alla simuleringar med Tracfeed. Kurvorna har sedan ritats i Excel utifrån rådata från Tracfeed.

Appendix B Simuleringsbeskrivningar

Körtiderna är från tåget startar till det kommit in till slutstationen.

Jämförande simulering Långsele - Vännäs och Hallsberg - Falköping

Denna simulering gjordes tidigare än de andra, därför skiljer sig utförandet något. För utvärderingen spelar det dock ingen roll, men man måste vara medveten om att t.ex. körtidernas absoluta värden bara kan jämföras inom en simulering och inte mellan simuleringarna. De procentuella värdena går dock bra att jämföra så länge tågen och uppehållsmönstret är samma. Kontaktledningen matas i sträckans ändpunkter och impedansen är satt till 0.0001+j0,0001 Ohm vilket ger en konstant spänning utmed hela sträckan.

10.3.1.1 Hallsberg - Falköping

Samtliga tåg kör efter samma uppehållsmönster och har 60 sek. uppehåll på mellanstationerna:

0.016	Hallsbergs pbg	
30.151	Laxå	60 sek. uppehåll
75.001	Töreboda	60 sek. uppehåll
113.646	Skövde c	60 sek. uppehåll
144.075	Falköpings c	

10.3.1.2 Långsele – Vännäs

Persontågen kör enligt tidtabellen för rst94 och godstågen enligt gt9124. Uppehållen är 0 sekunder.

rst94-Lsl-Vns

0.373	Långsele
72.729	Kälvattnet
208.556	Vännäs

gt9124-Lsl-Vns

0.373	Långsele
32.386	Grönåsen
43.916	Aspeå
50.949	Holmån
62.088	Skorped
82.813	Anundsjö

106.252	Björnsjö
132.138	Långvattnet
208.556	Vännäs

Långsele - Vännäs

Tågen kör enligt två uppehållsmönster, Rc6 med resandetåg stannar få gånger samt godstågen stannar ofta för möten. Tidtabellerna är inspirerade av tidtabellerna för Rst 94 och Gt 9124 och kallas så nedan, dock med ett något förändrat uppehållsmönster, bland annat har ett uppehåll i Selsjön lagts till. Uppehållstiderna är 0 sekunder, dvs. tåget stannar endast och startar direkt igen.

Uppehåll Gt 9124: Långsele, Forsmo, Selsjön, Grönåsen, Aspeå, Holmån, Skorped, Anundsjö, Björnsjö, Långvattnet, Vännäs.

Uppehåll Rst 94: Långsele, Kälvattnet, Vännäs.

Uppsala-Gävle

Tre uppehållsmönster används, dessa är påhittade men inspirerade av verkliga tåg.

RST218 Rc6 (B) Upptåg eller liknande

RST564 X2 (S) X2000

GT6852 Rc4, Br185, El15 (A) Godståg

Uppehållstiderna är 0 sek, dvs. tåget stannar och accelererar omedelbart igen.

Rst218

0.218 Uppsala

43.917 Örbyhus

61.188 Tierp

101.424 Furuvik

113.037 Gävle c

Rst564

0.218 Uppsala c

61.188 Tierp

113.037 Gävle c

Gt6852

0.218 Uppsala c

43.917 Örbyhus

61.188 Tierp

96.991 Skutskär norra

113.037 Gävle c

Appendix C Accelerationskraft

Dragkraften ges av

$$F = m_a \cdot a + D$$

Där F är behovet av dragkraft, D det totala gångmotståndet och m_a den dynamiska massa, 1,1 gånger statiska massan. Detta används av Tracfeed om ingen annan dynamisk massa är angiven. För dessa tåg gäller tumregeln $m_a = m \cdot 1,1$

Gångmotståndet kan därmed räknas ut enligt

$$D = F - m \cdot 1,1 \cdot a$$

Men detta kan endast göras om $F > 0$. Om $F < 0$ eller 0 och a negativ innebär det att tåget bromsar. Om både $F = 0$ och $a \geq 0$ rullar tåget i en nedförsbacke.

Om däremot $F > 0$ och a negativ innebär det att tåget inte kan hålla hastigheten.

För att komma runt detta och kunna räkna med tillgänglig data är villkoret att $D = 0$ om $F \leq 0$. Därmed blir också accelerationskraften 0 i dessa fall då ingen dragkraft för beräkning av $D \cdot F$ finns tillgänglig.

Appendix D Manuell beräkning av $U_{\text{mean useful}}$

$U_{\text{mean useful}}$ beräknas endast då loket drar, dvs. inte under stillestånd, rullande eller bromsning, detta kan beräknas genom att endas ta med värden för $F \geq 0$. Data efter att tåget ankommit tas bort. Därefter tas ett värde varannan sekund ut. Tracfeed ger resultat i steg som är bråkdelar av en sekund när något händer och tidssteg längre än en sekund då inget händer. Av kvarvarande spänningar bildas medelvärde (summan av alla spänningar dividerat med antalet mätvärden). Resultat blir precis samma som det som Tracfeed räknar ut automatiskt.