

# Simulering av tågtrafik

– Fordons- och förarbeteende i simulering kontra verklighet



**LUNDS  
UNIVERSITET**

Lunds Tekniska Högskola

**LTH Ingenjörshögskolan vid Campus Helsingborg  
Teknik och samhälle**

Examensarbete:  
Fredrik Nilsson  
Martin Stridsberg

© Copyright Fredrik Nilsson, Martin Stridsberg

LTH Ingenjörshögskolan vid Campus Helsingborg  
Lunds universitet  
Box 882  
251 08 Helsingborg

LTH School of Engineering  
Lund University  
Box 882  
SE-251 08 Helsingborg  
Sweden

Tryckt i Sverige  
Media-Tryck  
Biblioteksdirektionen  
Lunds universitet  
Lund 2009

## Sammanfattning

Simuleringsprogram används inom järnvägsbranschen för att simulera tågtrafik under olika förhållanden. Då fordons- och förarbeteende är av stor vikt för tågtrafiksimuleringars resultat är det viktigt att dessa data modelleras på ett korrekt sätt utifrån verkliga förhållanden. Området fordons- och förarbeteende är relativt outforskat, varför studier inom området är önskvärda.

Syftet med detta examensarbete har varit att - utifrån tillgänglig fordons- och förardata - undersöka fordons- och förarbeteende för jämförelse mot dagens trafiksimuleringar i simuleringsprogrammet OpenTrack.

Genomförda simulering har visat att endast konstanta retardationer utifrån inställt retardationstal erhålls.

Vid analys och sammanställning av fordonsloggar har det kunnat utläsas att de genomsnittliga retardationerna varierar beroende på utgångshastighet, och att förarbeteendet spelar stor roll för bromssträckans längd. Bromssträckorna tenderar att minska i spridning ju lägre utgångshastigheten är. Andra fenomen som kunnat utläsas är tillsättnings- och lossningstid för bromsen samt ”upp- och nedstyrningstid” för dragkraften vid accelerationer. Analys av förarbeteendet har visat att retardationerna utförs med olika bromsverkan beroende på om retardationen är ATC-övervakad eller inte.

Vidare har jämförelsen mellan simulering och fordonslogg visat på att det finns skillnader mellan simulering och verkliga förhållanden, främst avseende retardationsegenskaper.

Resultatet av undersökningen har visat att det endast är rimligt att definiera ett normalfordon, då fordonsbeteende kan betraktas som en funktion av både fordons- och förarbeteende.

Slutligen har resultaten i examensarbetet visat på att det finns behov av nya och ändrade parametrar i OpenTrack, där retardationstal utifrån utgångshastighet är den viktigaste.

Nyckelord: Simulering tågtrafik, OpenTrack, fordonsbeteende, förarbeteende, X31 Öresundståg, Rc-lok

## Summary

Simulation programs are used within the railway sector in order to simulate train traffic during different conditions. While vehicle- and driver behaviour are of great importance for train traffic simulations results, it's important that these data are correct on the basis of true relations. The subject vehicle- and driver behaviour is relative non-explored. Therefore are studies within the area desirable.

The purpose of this exam work has been to - on the basis of available vehicle- and driver data - examine vehicle- and driver behaviour for comparison against today's traffic simulations in the simulation program OpenTrack.

Simulations has shown that only constant deceleration, on the basis of given deceleration rate setting, is received at simulation.

The analysis and summary of vehicle logs has revealed that the average decelerations varies depending on it's start speed and that driver behaviour plays a great role for the brake stretch's length. The brake stretches tend to decrease when the start speed does. Other discovered phenomena are appointment- and disengage time for the brake and "up- and downsteering time" for engine power at accelerations. Current driver behaviour has shown that depending on weather the decelerations is ATC-monitored or not, the decelerations are carried out with different brake effect.

Furthermore, the comparison between simulation and vehicle log shows that there are differences between simulation and true relations, mostly concerned deceleration properties.

The result of the examine has revealed that it's only reasonable to define a normal vehicle, while vehicle behaviour depends on both vehicle- and driver behaviour.

Finally, the results of the exam work have shown the need of new and changed parameters in OpenTrack where deceleration rate on the basis of start speed is the most important.

Keywords: Simulation of train traffic, OpenTrack, vehicle behaviour, engine driver behaviour, X31 Oeresund Train, Rc-engine

## Förord

Examensarbetet avslutar högskoleingenjörsutbildningen i byggteknik med inriktning på infrastruktur – järnvägsteknik vid Lunds Tekniska Högskola, Campus Helsingborg.

Arbetet har genomförts som ett samarbete mellan Lunds Tekniska Högskola och Vectura Consulting AB.

Speciellt tack vill vi ge till SJ AB och Göran Andersson som bistått med ovärderligt underlag för att möjliggöra detta examensarbete.

Vidare vill vi tacka Vectura Consulting AB som bistått med både utbildning i simuleringsprogrammet OpenTrack och tekniskt handledarskap, via Olof Fredholm och Peter Hellström.

Vi vill även tacka Åsa Knutsson på Lunds Tekniska Högskola som agerat akademisk handledare för hennes råd och engagemang under arbetets gång.

Malmö, maj 2009

Fredrik Nilsson, Martin Stridsberg

## Definitioner

Adhesion	Vidhäftning mellan hjul och räl, även kallat tillgänglig- eller uttagbar adhesion
Adhensionsvikt	Totala massan som vilar på samtliga drivande hjul
ATC-information	Information från ATC systemet
ATC-övervakad retardation	Retardation där ATC övervakar retardationsförloppet
Bromscylinder	Cylinder vilken skapar tryckkraft för bromsblock/belägg
Bromsgrupp	Indelning av fordon utifrån bromskategori
Bromskategorier	Inställningsmöjlighet på fordonet för förändring av bromsens egenskaper
Bromskraft	Retarderande kraft för att minska ett tågs rörelse
Bromssträcka/tid	Sträcka/tid ett fordon behöver för att bromsa från en given hastighet ner till noll
Bromsvikt	Retardationsförmågan uttryckt i vikt
Drag-/Driv fordon	Fordon med traktionsutrustning
Dragkraft	Accelererande kraft för att sätta ett tåg i rörelse
Ekvivalent massa	Fordons totala massa med hänsyn till tillägg för roterande massor, även kallat dynamisk massa/vikt
El-pneumatiskt bromssystem	Elektriskt och tryckluftstyrtd bromssystem
Friktion	Kraft som motverkar rörelse
Förarbromsventil	Reglage som styr tågets huvudledning

Förrådsluftbehållare	Tryckluftsbehållare på fordon för luftmatning till bromscylindrarna
Gångmotstånd	Samlingsnamn på de olika typer av motstånd som finns och motverkar ett tågs rörelser i en given färdriktning
Huvudledning	Tryckluftsburen genomgående ledning som fungerar som matning och styrsignal för bromssystemet
Konicitet	Ett mått för ett hjuls konlutning
Körplan	Tidigare kallat tidtabell
Loss-stöt	Tryckluft med högt tryck matas ut i tågets huvudledning för snabbare bromslossning
Matarledning	Tryckluftsburen genomgående högtrycksledning som fungerar som matning för bromssystemet
Normal - fordon/förare	Ett genomsnittligt fordon och förare med hänsyn till framförandet
Pneumatiskt bromssystem	Tryckluftstyrt bromssystem
Registreringsutrustning	Tågets "svarta låda" vilken kontinuerligt under framförandet av tåget registrerar fordonsdata
Retardationstal	Retardationsförmågan uttryckt i $m/s^2$
Simuleringsverktyg	Hjälpmiddel för att simulera verkligheten efter vissa givna förutsättningar
STH	Tågets största tillåtna hastighet
Styrventil	Ventil på fordon för styrning av bromscylindertryck
Säkerhets slinga	Elektrisk huvudledning

Tillsättnings- och lossningstid	Tiden det tar från broms-begäran/lossning utförs till full/ingen bromsverkan erhålls
Traktion	Tågets framdrivning
Traktionssystem/utrustning	Utrustning och system för framdrivning av fordon
Upp- och nedstyrningstid	Tiden det tar från en acceleration inleds/avslutas till full/ingen acceleration erhålls



# Innehållsförteckning

<b>1 Inledning</b> .....	<b>1</b>
1.1 Bakgrund.....	1
1.2 Syfte och problemformulering.....	1
1.3 Avgränsning och fokusering .....	2
1.4 Metod.....	2
<b>2 Litteraturstudie</b> .....	<b>3</b>
2.1 Tidigare studier.....	3
2.2 Simuleringsverktyg .....	3
2.2.1 OpenTrack .....	3
2.2.2 Fordonsdata.....	4
2.2.3 Infrastruktur (järnvägsnätet) .....	4
2.2.4 Körplan .....	5
2.2.5 Simulering.....	5
2.2.6 Utdata .....	5
2.2.7 Inställningsmöjligheter i OpenTrack .....	5
2.3 Förarbeteende.....	5
2.3.1 Allmänt.....	5
2.3.2 Olika typer av förare.....	6
2.3.3 Förarbeteende resandetåg - godståg .....	6
2.4 Fordon .....	7
2.4.1 Traktionssystem.....	7
2.4.2 Bromssystem .....	9
2.4.3 ATC system .....	14
2.4.4 Teknisk data fordon X31 – Öresundståg .....	16
2.4.5 Teknisk data fordon Rc-lok och vagnar .....	17
2.5 Kraft och rörelse.....	19
2.5.1 Adhesion.....	19
2.5.2 Ekvivalent massa .....	21
2.5.3 Gångmotstånd .....	21
2.5.4 Dragkraft .....	23
2.5.5 Bromskraft.....	26
2.6 Gångtidsberäkningar.....	28
2.6.1 Gångtider .....	28
2.6.2 Tillsättningsförlopp vid en retardation – Ett exempel .....	28
<b>3 Simuleringar</b> .....	<b>32</b>
3.1 Beskrivning av simuleringsmodellen.....	32
3.2 Grundinställningar i simuleringarna .....	32
3.2.1 Fordon .....	32
3.2.2 Dragkraft och retardation.....	32
3.2.3 Gångmotstånd .....	33

<b>3.3 Sammanställning av grundsimuleringarna</b> .....	<b>34</b>
<b>3.4 Slutsatser kapitel 3</b> .....	<b>36</b>
<b>4 Fordonsloggar</b> .....	<b>37</b>
<b>4.1 Beskrivning av loggning av fordonsdata</b> .....	<b>37</b>
<b>4.2 Behandlande av fordonsloggar</b> .....	<b>37</b>
<b>4.3 Sammanställning av fordonsloggar</b> .....	<b>40</b>
4.3.1 Retardation X31 .....	40
4.3.2 Acceleration X31 .....	51
4.3.3 Retardation Rc-lokdragna tåg.....	52
4.3.4 Acceleration Rc-lokdragna tåg.....	53
<b>4.4 Slutsatser kapitel 4</b> .....	<b>54</b>
<b>5 Jämförelse simulering – fordonslogg</b> .....	<b>55</b>
<b>5.1 X31</b> .....	<b>55</b>
5.1.1 Retardation.....	55
5.1.2 Acceleration .....	55
<b>5.2 Rc-lokdragna tåg</b> .....	<b>56</b>
5.2.1 Retardation.....	56
5.2.2 Acceleration .....	56
<b>6 Slutdiskussion och resultat</b> .....	<b>57</b>
<b>6.1 Slutdiskussion</b> .....	<b>57</b>
<b>6.2 Resultat</b> .....	<b>60</b>
<b>6.3 Allmänna tankar kring godståg</b> .....	<b>61</b>
<b>6.4 Vidare studier</b> .....	<b>61</b>
<b>7 Referenser</b> .....	<b>62</b>
<b>Bilaga 1 Ekvivalent massa</b> .....	<b>64</b>
<b>Bilaga 2 Utdrag fordonslogg</b> .....	<b>66</b>

# 1 Inledning

Simuleringsprogram används för att simulera olika händelseförlopp inom många vitt skilda områden. Inom järnvägssektorn är trafiksimuleringar ett viktigt redskap för att kunna få uppfattning om hur kapaciteten på järnvägen förändras genom olika sorters ingrepp i infrastrukturen. Det kan röra sig om mindre förändringar på en befintlig järnvägsanläggning (t.ex. förändrade blocksträckor), men också helt nya järnvägsanläggningar. För trafiksimuleringar inom järnvägssektorn används framför allt programmen OpenTrack och RailSys.

## 1.1 Bakgrund

På initiativ av Vectura Consulting AB har ett för dem relevant problem presenterats gällande fordons- och förarbeteende och dess inverkan på tågtrafiksimuleringar i simuleringsverktyget OpenTrack. Fordons- och förarbeteende är relativt outforskade områden som är av stor vikt vid simuleringar av tågtrafik. Vidare studier inom området är önskvärt för att kunna bygga upp mer realistiska simuleringsmodeller. Bättre modeller ger i sin tur högre kvalitet på simuleringarna. Det finns behov av att fortsätta arbetet med att validera simuleringsmodeller genom att jämföra modell mot verklighet. Olika tågtyper med olika egenskaper och ännu fler fordonsförare med skilda förarbeteende, gör det viktigt att få en förståelse av hur ett normalfordon respektive en normalförare beter sig. Resultatet av simuleringarna beror dels på den simuleringsmodell som skall beskriva verkligheten, men också på de indata som finns att tillgå. Fel i indata ger fel i utdata och därmed kan felaktiga slutsatser dras om det verkliga utfallet. För att kunna genomföra trafiksimuleringar behöver underlag (t.ex. fordonsloggar) för olika fordon tas fram.

## 1.2 Syfte och problemformulering

Syftet med examensarbetet är att undersöka fordons- och förarbeteende vid framförande av tåg i verkligheten för jämförelse mot de modeller som för närvarande används i simuleringsprogrammet OpenTrack.

De problemformuleringar som examensarbetet utgår ifrån är:

- Avbildar den simulerade tågtrafiken den verkliga avseende fordons- och förarbeteende?
- Finns det behov av nya eller ändrade parametrar i OpenTrack?

- Går det utifrån examensarbetet att definiera ett normalfordon och en normalförare (beroende på fordonstyp)?

### 1.3 Avgränsning och fokusering

Med utgångspunkt från de för examensarbetet tillgängliga fordons- och förardata har avgränsningar avseende undersökta fordon gjorts. *Öresundståg (littera X31)* och *Rc-lokdragna resandetåg* har undersökts där fokus har legat på X31. Då några fordonsloggar för godståg inte kunnat erhållas har den tågtypen endast behandlats teoretiskt.

### 1.4 Metod

Examensarbetet bygger på litteraturstudier, simuleringar och analys av fordonsloggar. Dispositionen följer en för arbetet bestämd struktur genom att först ge en allmän och teoretisk bild av ämnet (litteraturstudien) och sedan behandla respektive del (simulering, fordonsloggar, jämförelse) var för sig med slutsatser, för att slutligen knytas ihop i slutdiskussion och resultat. Tanken med dispositionens uppdelning är att varje del behöver beskrivas var för sig för att inte missa eventuella variationer i respektive del.

Examensarbetet har genomförts i tre delar.

*Den första delen* behandlar litteraturstudien. Här genomfördes det efterforskningsarbete i litteraturen som ligger till grund för examensarbetets teoretiska beskrivningar av relaterade teknikområden.

*Den andra delen* behandlar simuleringar i OpenTrack och fordonsloggar. Utförliga beskrivningar av metod och genomföranden samt slutsatser ges under respektive kapitel. Här har även undersökning av tillgängligt datamaterial för fordons- och förarbeteende gjorts. Vi har prioriterat indata i form av fordonsloggar då vi är intresserade av att definiera ett normalfordon och en normalförare oberoende av sträcka. Då fordonsloggarna för Rc-lokdragna tåg endast omfattar resandetåg gjordes en telefonintervju med en erfaren förare för att ge en uppfattning om skillnaden mellan framförandet av resande- och godståg.

*Den tredje delen* behandlar analys och jämförelse mellan sammanställningar och slutsatser av fordonsloggar och simuleringar i OpenTrack. Slutdiskussion och resultat presenteras.

## 2 Litteraturstudie

Litteraturstudien ger en teoretisk beskrivning av de i examensarbetet ingående tekniska områdena. Kapitlet behandlar simuleringsverktyg, förarbeteende, fordon, krafter och rörelser samt gångtidsberäkningar.

### 2.1 Tidigare studier

En tidigare studie är gjort av Banverket Projektering då data och statistik togs fram för pendeltågen (fordon med littera X10 och X60) i Stockholm genom fältstudier och analyser av fordonsloggar. Det var främst retardations-, accelerations-, *tillsättnings-*, och *lossningstider* (se kap 2.4.2 *Bromssystem*) samt förarbeteenden som undersöktes.

Resultatet av simuleringarna i studien visar på stora skillnader mellan de simuleringar som genomförts tidigare och de som gjorts med de nya retardationsvärdena. Skillnaderna gällande retardationernas varaktighet är mycket stora och belyser vikten av att väga in parametrar för inbromsningsfördröjningar. Studien visade även stora variationer på olika körstilar hos förarna trots att förarna endast kan styra fordonets acceleration och retardation.

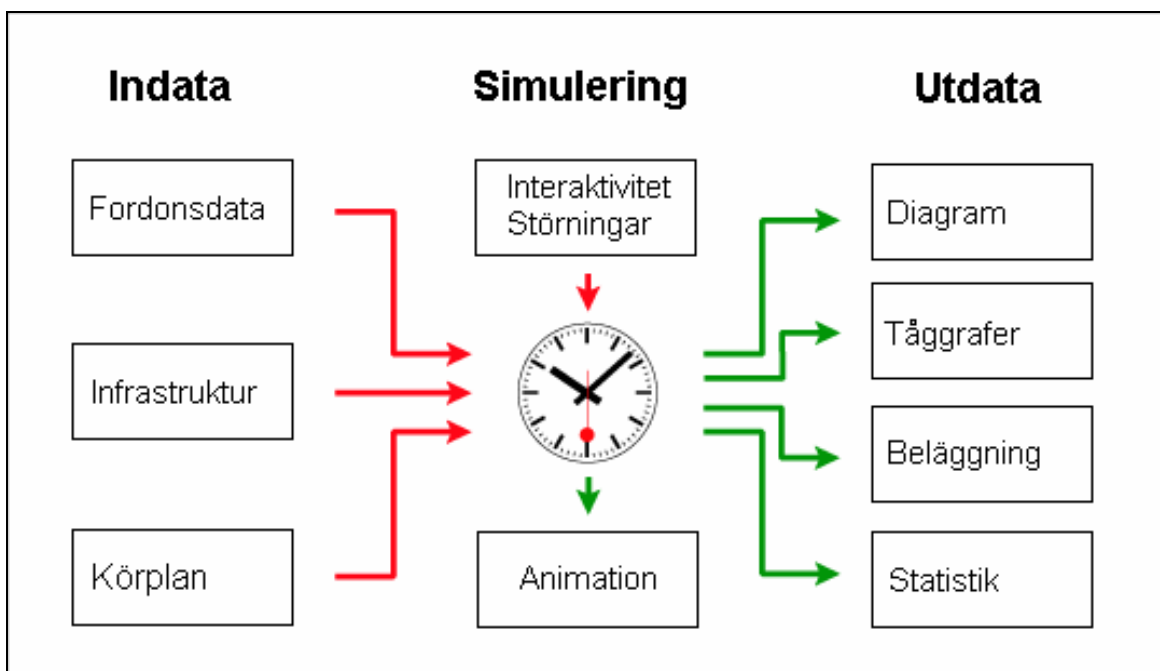
### 2.2 Simuleringsverktyg

Simuleringsverktyg är hjälpmedel för att simulera verkligheten efter vissa givna förutsättningar. Inom järnvägssektorn används program som RailSys och OpenTrack för att bland annat simulera tågtrafik på modeller av verkliga banor, existerande eller framtida. I detta examensarbete används simuleringsverktyget OpenTrack. En kort presentation av OpenTrack som simuleringsverktyg ges nedan.

#### 2.2.1 OpenTrack

OpenTrack är ett simuleringsprogram som används för simuleringar av olika järnvägsspecifika kapacitetssituationer. Exempel på användningsområde kan vara att bestämma signalplacering längs en viss järnvägssträckning för att uppnå maximal kapacitet.

OpenTrack är framtaget och utvecklat av forskare på ETH, Tekniska Högskolan i Zürich, i syfte att skapa ett användarvänligt simuleringsverktyg för järnvägstrafik (OpenTrack 2009).



**Figur 2.2-1** Schematisk bild över simuleringsprocessen i OpenTrack  
(Översatt till svenska, OpenTrack 2009)

Som framgår av *figur 2.2-1*, använder OpenTrack vissa inparametrar. Enkelt uttryckt kan simuleringen beskrivas genom att ett visst antal tåg med givna egenskaper trafikerar en förutbestämd järnvägssträckning med ett förutbestämt signalsystem, efter en given *körplan* (f.d. *tidtabell*). Under simuleringen beräknas samtliga tågrörelser för alla ingående tåg och samtidigt registreras kontinuerligt hastighet, position, acceleration mm. Resultatet av en simulering kan bearbetas och presenteras med hjälp av OpenTrack genom diagram, grafer och statistik (OpenTrack Info 2009).

### 2.2.2 Fordonsdata

OpenTrack sparar samtliga fordonsdata i en databas kallad depots (sv. depå). Databasen innehåller information om tågens vikt, längd, *dragkraft* (se *kap 2.5.4 Dragkraft*), *adhesionsvikt* (se *kap 2.5.1 Adhesion*) mm. Med utgångspunkt från databasen kan olika tågsätt kombineras genom att ett eller flera lok sätts ihop med olika typer av vagnar. De färdiga tågen lagras i en separat databas (OpenTrack Info 2009).

### 2.2.3 Infrastruktur (järnvägsnätet)

Banan (järnvägsnätet) beskrivs genom noder och länkar. Noder och länkar kan tilldelas olika attribut så som uppgifter om längd, lutning, *sth* (*största tillåtna hastighet*) osv. (OpenTrack Info 2009).

#### 2.2.4 Körplan

Körplanen i OpenTrack innehåller information om varje enskilt tåg på varje station. Informationen innefattar bland annat ankomst-, uppehålls- och avgångstider (OpenTrack Info 2009).

#### 2.2.5 Simulering

Under en simulering försöker tågen på bästa sätt trafikera järnvägsnätet efter den givna körplanen. I OpenTrack tillåts även att hinder och störningsmoment placeras ut i järnvägsnätet för att t.ex. kunna se hur ett visst trafikupplägg påverkas. För åskådliggörande av simuleringarna kan tågrörelserna följas i realtid genom animation av tågen (OpenTrack Info 2009).

#### 2.2.6 Utdata

OpenTrack har en stor variation av möjliga utdata efter en simulering. Det rör sig om allt från hastighetsdiagram, beläggning av spår till förseningsstatistik. Utdata presenteras antingen i diagramform eller i dataform via ett excel-ark (OpenTrack Info 2009).

#### 2.2.7 Inställningsmöjligheter i OpenTrack

I OpenTrack går det att ändra data för olika fordon, förare samt för infrastrukturen. Vid de tillfällen simuleringar inte stämmer med verkligheten justeras inställningar för fordon och förare. De fordonsdata som kan justeras är retardationsförmåga, tågvikt, tåglängd, dragkraft, *gångmotstånd* (se kap 2.5.3 *Gångmotstånd*), adhesionsvikt samt vissa tidstillägg för exempelvis bromslossning. Fordonets prestanda kan också justeras procentuellt i förhållande till dess maximala prestanda (Hellström 2009).

### 2.3 Förarbeteende

Det finns för varje förare ett specifikt förarbeteende vilket påverkar hur fordonen framförs. Kapitlet beskriver förarens roll vid framförandet av tåg.

#### 2.3.1 Allmänt

Föraren har ansvaret för framförandet av tåget. Hur tåget framförs beror på förutsättningar som körplan och signalanläggning. Andra aspekter som påverkar är säkerheten för resenärer och personal, passagerarkomfort och punktlighet. Därför är det viktigt att föraren har förståelse och kunskap om hur tåget bäst ska framföras utifrån givna förutsättningar. Den information som föraren har tillgång till och anpassar sin körning efter är *ATC*-information (se kap 2.4.3 *ATC system*), hastighet, bromstryck samt information från signaler och tavlor längs banan. Förarens möjlighet att påverka framförandet är genom reglering av broms och pådrag (Kecklund 2001).

En studie av förarbeteende gjord vid Linköpings universitet identifierade olika strategier för framförandet. De tågtyper som studerades var pendeltåg och fjärrtåg (littera X2). För båda tågtyperna identifierades strategier för säkerhet, övervakning, körskicklighet och tidsoptimering. Specifikt för X2 var att även en strategi för planering av körningen identifierades. Skillnaden mellan de olika tågtyperna består i att X2 kräver en planeringsstrategi som förarna använder sig av för att kompensera för den större hastigheten samt det större avstånd som ett X2-fordon avverkar på samma tid som ett pendeltåg (Kecklund 2001).

Vidare visar studien att ATC är en viktig informationskälla både vid körning av pendeltåg och av X2 men att optisk signalinformation används mer vid framförande av pendeltåg. Av studien framgår att förarna anser att ATC är ett mycket viktigt hjälpmedel och stöd i körningen.

Det visade sig också att det förekommer misstag och fel vid framtagning av tågdata och inmatning av uppgifter i ATC och detta var vanligast när förutsättningarna för banan och fordonet förändrades under resan. Felinställda värden kan medföra att tåget inte bromsar som förväntat eller att sth överskrids (Kecklund 2001).

### 2.3.2 Olika typer av förare

I den tidigare nämnda studien identifierades två olika körstilar bland förarna. En del förare körde på ”pipet” dvs. agerade och utförde åtgärder först när ATC indikerade och den andra delen förare försökte planera sin körning och agera före ATC indikerade.

Fördelen med att köra på ”pipet” är att körningen ofta blir effektiv, systemets marginaler utnyttjas och antalet onödiga inbromsningar minskas. Nackdelen är att körstilen skapar ett automatiserat beteende som kan utgöra ett riskmoment då ATC övervakningen helt eller delvis faller bort. Av studien framgår att de förare som körde på ”pipet” var mer säkra och vågade utnyttja systemets marginaler när de körde medan de förare som planerade körningen verkade köra mer försiktigt (Kecklund 2001).

### 2.3.3 Förarbeteende resandetåg - godståg

Utifrån gjord intervju med förare som kört både resande- och godståg har en kort sammanställning gjorts. Skillnader mellan förarbeteendet vid framförandet av godståg och resandetåg är tydliga. Då godståg ofta är tunga, långa och bara utrustade med *huvudledning* (se kap 2.4.2 *Bromssystem*) ställs det högre krav på föraren och dennes kännedom om sträckan som ska trafikeras. Den stora tågvikten gör att föraren måste vara försiktig med pådraget då det annars finns risk att ”dra sönder” tåget dvs. att kopplena



mellan vagnarna brister. Speciellt efter inbromsningar är det viktigt att alla bromsar är helt loss innan en acceleration påbörjas. Beroende på tågens längd och bromssystem kan den tiden det tar för bromsarna att lossa vara mycket lång (10-12 sekunder). Eftersom godståg bara har en huvudledning och inte *matarledning* (se kap 2.4.2 *Bromssystem*) så brukar en så kallad ”*loss-stöt*” göras för att få loss bromsarna snabbare. En loss-stöt innebär att tryckluft med högre tryck (10 *kPa*) matas ut i tågets huvudledning. Accelerationstiden för ett godståg påverkas dels av tågvikten men även av att loken inte kan ta ut full dragkraft beroende på *tillgänglig adhesion* (se kap 2.5.1 *Adhesion*). Godstågsförarna anpassar sin körning efter banans profil för att undvika onödiga bromsningar. Detta görs genom att inför ett medlut ha så låg hastighet att tåget inte av sig själva genom rullning accelererar så att gällande sth överskrids i medlutet. Detsamma gäller inför motlut då förarna ökar pådraget för att inte få stopp i motlutet (Nilsson 2009).

## 2.4 Fordon

För att kunna ta hänsyn till ett fordons beteende vid simuleringar är det viktigt att förstå hur de i fordonet ingående komponenterna fungerar. I kapitlet beskrivs de för arbetet viktigaste delarna i ett fordon.

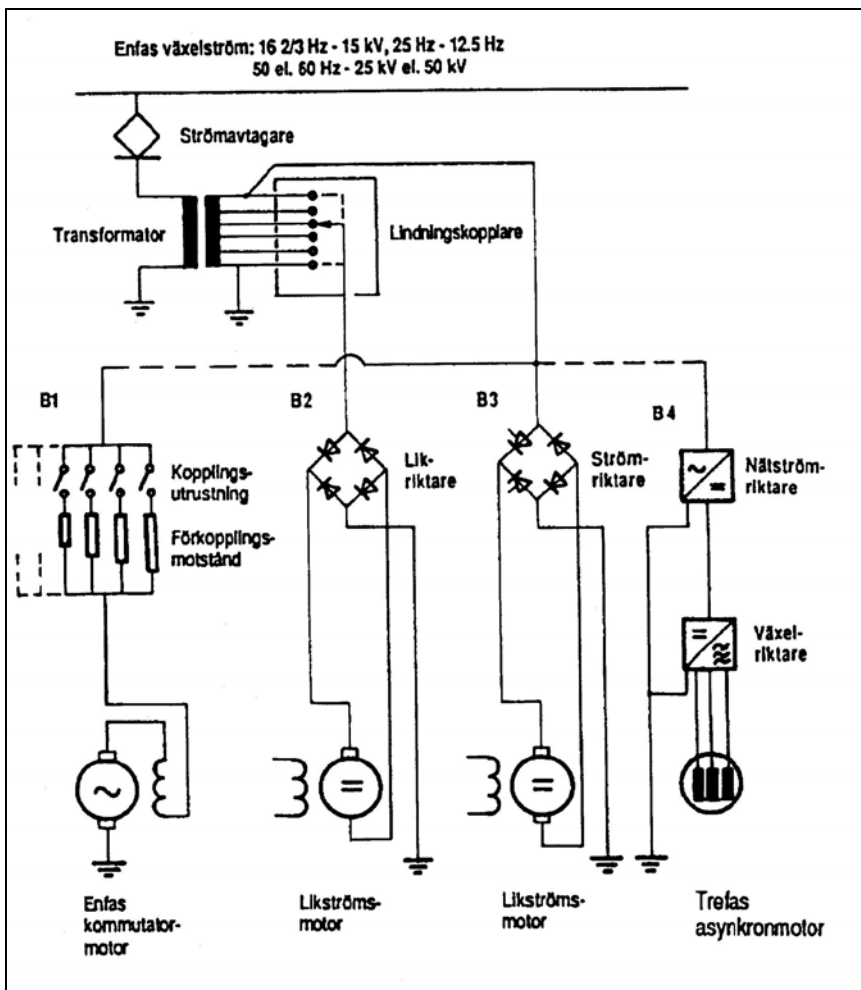
### 2.4.1 Traktionssystem

Framdrivningen av tåg kallas *traktion* och framdrivningsutrustningen *traktionsutrustning*. De vanligaste metoderna för att driva fram tåg är genom *dieseldrift* eller *eldrift*. Vid dieseldrift skapas momentkrafter i en kolvmotor vilka överförs till hjulen. Överföringen kan ske på tre olika sätt: genom *elektrisk-, hydraulisk- eller mekanisk överföring*. Vid elektrisk överföring kallas fordonen *dieselektriska*. Fordonen drivs inte direkt av dieselmotorn utan istället driver denna en elgenerator vilken i sin tur driver traktionsmotorerna som är elektriska. Vid hydraulisk överföring kallas fordonen *dieselhydrauliska*. Fordonen drivs då indirekt av dieselmotorn via en hydraulisk transmission vilken kan jämföras med en automatväxellåda (Andersson & Berg 2007).

Både elektrisk- och hydraulisk kraftöverföring skapar en närmast steglös och avbrottsfri ändring av utväxlingsförhållandet. Detta är ett måste för att eliminera tillfälliga avbrott i det drivande momentet dvs. eliminera kraftiga ryck i tåget som kan leda till att kopplingsanordningar mellan fordon går av. Lättare spårfordon som motorvagnar, lokomotorer eller dressiner drivs ofta direkt av dieselmotorn genom mekanisk överföring (Andersson & Berg 2007).

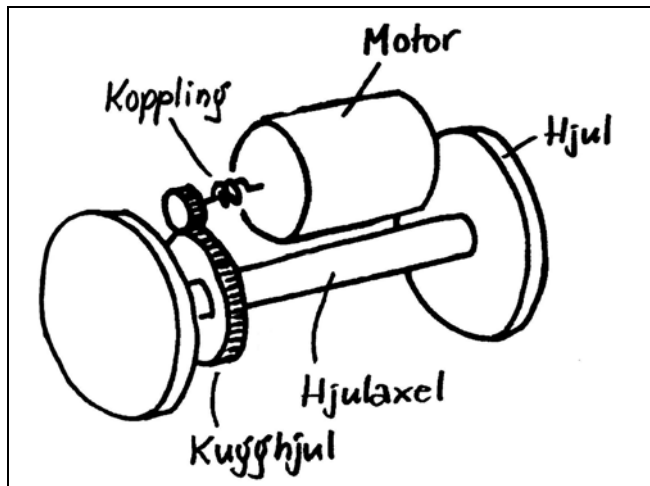
Vid eldrift hämtas elenergi från kontaktledningen vilken är en spänningsförande elledning ovanför spåret. Elenergin överförs till fordonet

genom en strömavtagare på taket. Väl i fordonet transformeras och regleras elenergin för att kunna driva och styra traktionsmotorerna. Exempel på olika traktionssystem visas i *figur 2.4-1* (Andersson & Berg 2007).



*Figur 2.4-1* Schematisk bild av de vanligaste elektriska traktionssystemen (Andersson & Berg 2007)

Överföringen av motormomentet till hjulen sker vanligtvis genom en mekanisk kugghjulstransmission (se *figur 2.4-2*). Även överföring via koppelstänger förekommer men detta sker främst i äldre fordonstyper (Andersson & Berg 2007).



Figur 2.4-2 Exempel på mekanisk kugghjulstransmission  
(Andersson & Berg 2007)

### 2.4.2 Bromssystem

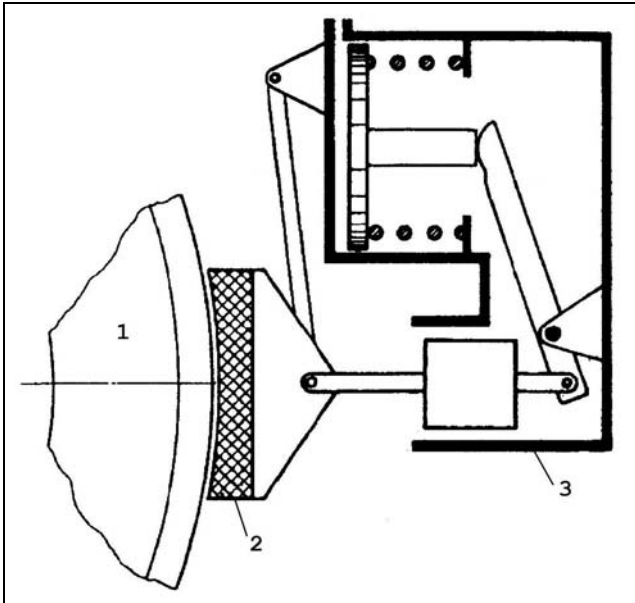
Säkerhetskraven för järnvägstrafik är högt ställda och den viktigaste säkerhetsfunktionen är bromssystemet och tågets bromsförmåga. Den största anledningen till detta är att ett tåg inte kan styra undan för hinder och ofta inte kan stanna på siktsträckan. Eftersom ett tåg alltid måste kunna stanna på de sträckor och avstånd som finns i banans signalsystem är det mycket viktigt att tågets bromsar alltid fungerar och att tågets *bromssträcka* (se kap 2.6.3 *Tillsättningsförlopp*) alltid kan beräknas och förutses (Andersson & Berg 2007).

Ett standardiserat bromssystem är en förutsättning för att kunna koppla ihop och styra bromsarna på spårfordon med olika utseende och tillverkare. I Europa är denna standard fastställd av UIC, International Union of Railways. Bromssystemets huvudsakliga uppgift är att bromsa tåget och att hålla det stilla vid uppehåll och uppställning. Bromssystemet måste även hindra hjulen från att bromsa fast (Andersson & Berg 2007). Bromssystemet är uppbyggt av en *bromsverkansdel* samt en *bromsstyrningsdel* (SJ Kompetensutveckling 1999).

Som omnämns längre fram i arbetet (se kap 2.5.5 *Bromskrafter*) finns tre olika principer för att utveckla bromskrafter mellan fordon och räl, *adhesion* (se kap 2.5.1 *Adhesion*) mellan hjul och räl, *friktion* mellan glidsko och räl samt virvelströmsbroms ovanför rälerna.

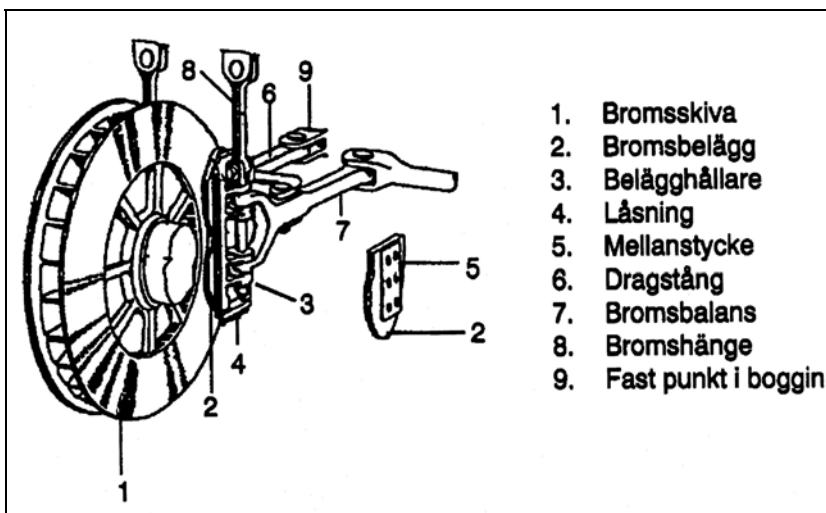
Den absolut vanligaste är den adhesionsberoende bromsen som kan vara både mekanisk och elektrisk (Andersson & Berg 2007).

Den äldre typen av mekanisk broms är *blockbromsen* vilken utvecklar bromskrafter genom friktionen som uppkommer när en bromscylinde trycker bromsblock mot hjulets löpbana (se figur 2.4-3) (Andersson & Berg 2007).



**Figur 2.4-3** Blockbroms: 1) Hjul 2) Bromsblock  
3) Bromscylander  
(Andersson & Berg 2007)

Den nyare typen av mekanisk broms är *skivbromsen* vilken utvecklar bromskrafter genom friktionen som uppkommer när en bromscylander trycker två bromsbelägg mot en bromsskiva från varsitt håll (se *figur 2.4-4*). Bromsskivorna kan vara monterade på hjulen eller separat på hjulaxeln (Andersson & Berg 2007).

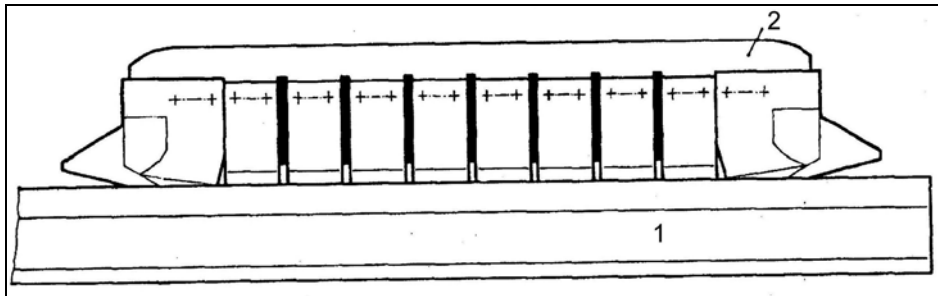


**Figur 2.4-4** Skivbroms (Andersson & Berg 2007)

*Elektrisk broms* innebär att utvecklingen av bromskraft sker genom att tågets traktionsmotorer arbetar som generatorer vilket ger en bromsande moment på

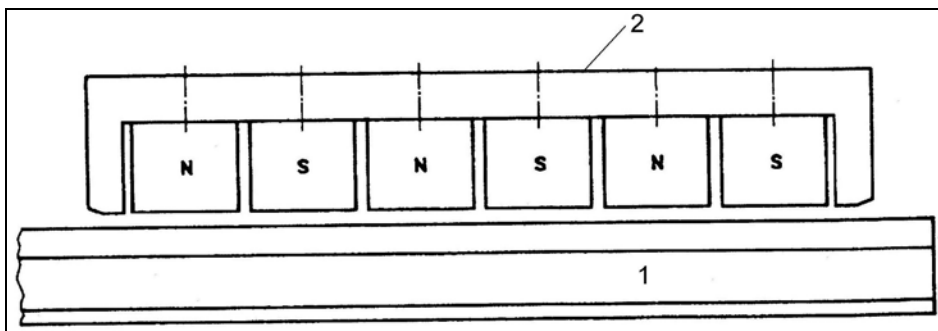
drivhjulen. Alla mekaniska och elektriska adhesionsberoende bromstyper går att kombinera på ett eller annat sätt (Andersson & Berg 2007).

Broms som utvecklar bromskraft genom friktion mellan glidskor och räl kallas *magnetskenbroms* (se figur 2.4-5). Magnetskenbromsen fungerar så att en glidsko magnetiseras och trycks mot rälens med tryckluft och därigenom skapas vertikala bromskrafter i form av friktionskrafter och magnetiska krafter (Andersson & Berg 2007).



Figur 2.4-5 Magnetskenbroms: 1) Räl 2) Magnetskena  
(Andersson & Berg 2007)

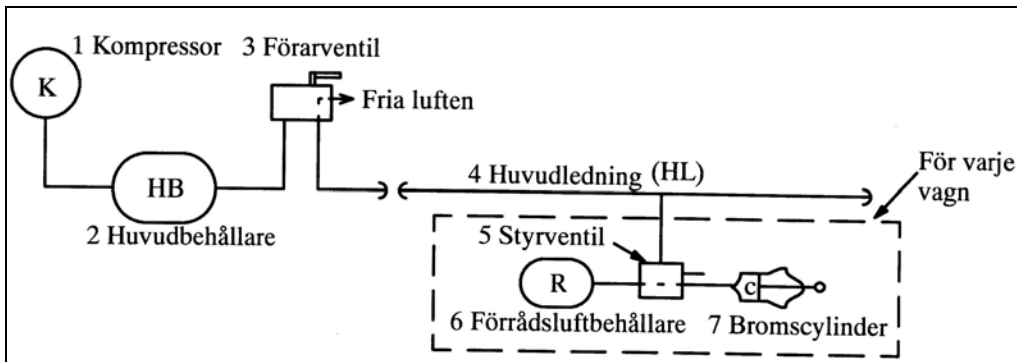
Den enda bromstyp som inte utnyttjar friktionskrafter är virvelströmsbromsen (se figur 2.4-6). Den utvecklar bromskraft genom att magnetiska krafter skapas mellan räl och virvelströmsbromsens apparatur (Andersson & Berg 2007).



Figur 2.4-6 Virvelströmsbroms: 1) Räl 2) Virvelströmsanordning  
(Andersson & Berg 2007)

För styrning av bromssystemet används idag huvudsak två olika slags tekniker, *pneumatisk (P)* samt *elektropneumatisk (EP)*.

I det pneumatiska systemet (se figur 2.4-7) används tryckluft för styrning av bromsen. Varje fordon har minst en huvudledning för tryckluft, en *styrventil* samt en *förrådsluftbehållare*. Huvudledningen fungerar som en luftburen styrsignal för bromsen samt som luftförsörjare för varje fordon förrådsluftbehållare (dock ej drivfordon).



Figur 2.4-7 Pneumatiskt bromssystem uppbyggnad (Andersson & Berg 2007)

Styrventilen består av två tryckluftskammare och förhållandet mellan dessa är i jämvikt vid ett huvudledningstryck på 500 kPa. Trycksänks huvudledningen sänks även trycket i styrventilens ena kammare vilket kompenseras genom att styrventilens andra kammare får motsvarande tryckökning. Övertrycket som bildas i den andra kammaren skickar styrventilen in i fordonets bromscylindrar vilket tillsätter bromssystemets bromsverkningsdel (Andersson & Berg, 2007).

Eftersom fordonens styrventiler reagerar olika fort beroende på avståndet till förarbromsventilen ansätts och lossas fordonens bromsar inte samtidigt. Detta medför att ett tryckluftssystem för bromsstyrning är mycket trögt. Tiden det tar från en trycksänkning av huvudledningen tills alla fordon har full bromsverkan kallas tillsättnings tid. Motsvarande gäller vid lossning av bromsen vilket kallas lossningstid.

Vid ett huvudledningstryck på 500 kPa är bromsen loss och ingen bromsverkan erhålls. Maximalt bromscylindertryck är 150 kPa. Genom en sänkning av huvudledningstrycket med 150 kPa (bromscylindern får motsvarande tryckökning) uppnås alltså full bromsverkan redan vid ett huvudledningstryck på 350 kPa.

Vid nödbroms töms huvudledningen helt men detta ger ingen högre bromsverkan än fullbroms, utan endast en kortare tillsättnings tid för bromsen (Andersson & Berg, 2007).

Eftersom tillsättnings tiden varierar stort i långa tåg medför detta en risk för urspårning och skador vid bromsningar. Detta beror på att fordon i tågets bakre del kan trycka på tågets främre del vilket ger stora längstryckkrafter och längsryck i tåget. Detta motverkas genom att anpassa bromssystemet till en bromskategori beroende på tåglängd, tågvikt och sth. Val av bromskategori görs oftast med hjälp av ett omställningshandtag på fordonet. De olika kategorierna som finns är G-, P- och R-broms vilka har olika egenskaper för tillsättnings- och lossningstid samt bromskraft (se tabell 2.4-1) (Bergstedt Rune 2005).

Tabell 2.4-1 Jämförelse bromslägen (Bergstedt 2005)

Bromsläge	Bromscylinder Tryck ( Bar )	Bromscylinder Tillsättningstid ( s )	Bromscylinder Lossningstid ( s )
G	Lågt	18-30	45-60
P	Lågt	3-5	15-20
R	Högt	3-5	15-20

Hur fordon med olika bromskategorier får innefattas i ett tågsätt indelas enligt gällande *bromsgrupper*. De bromsgrupper som idag är tillåtna är P/R, G samt Ö.

- Bromsgrupp G då alla fordon har bromskategori G.
- Bromsgrupp P/R då alla fordon har bromskategori P eller R, undantag för verksamt drivfordon vilket får ha bromskategori G.
- Bromsgrupp Ö då villkoren för ovanstående bromsgrupper ej är uppfyllda.

(JvSFS 2008:7 B1+B11)

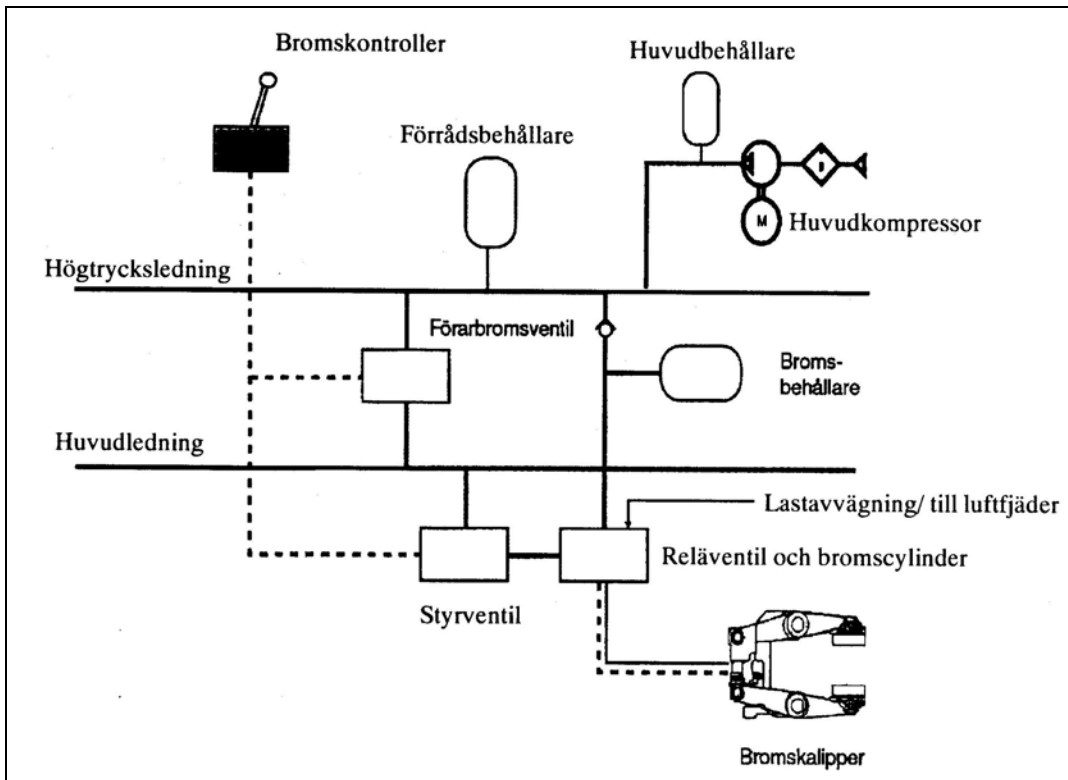
För laddning av tryckluftsystemet används en kompressor i drivfordonet vilken förser en huvudbehållare i samma fordon med ett lufttryck på 800-1000 *kPa* övertryck. För styrning av huvudledningstrycket används en *förlarbromsventil* vilken justerar huvudledningstrycket vid bromsning och ser till att trycket i huvudledningen aldrig överstiger 500 *kPa*.

Förutom drivfordonet har varje fordon en egen förrådsluftbehållare vilken försörjer det egna fordonet med luft. Förrådsluftbehållaren matas av huvudledningen vilket medför att matningstrycket är samma som huvudledningstrycket. Detta gör att förrådsluftbehållarna endast laddas när bromsen är loss eller lossas (Andersson & Berg 2007). Vid upprepade trycksänkningar hinner förrådsluftbehållarna inte laddas tillräckligt och bromsen kan ta mycket lång tid att lossa (Bergstedt Rune 2005).

Fordon som används i resandetåg är oftast utrustade med en högtrycksledning (även kallad matarledning) för snabbare och jämnare matning av förrådsluftbehållare då dessa vagnar har fler luftförbrukare som t ex dörrar (Bergstedt Rune 2005).

Bromssystem med tryckluft- eller elektrisk huvudledning har en inbyggd nödbromsfunktion vilken medför att bromsen omedelbart tillsätts om huvudledningen på något sätt bryts (om t ex en vagn slits loss) (Andersson & Berg 2007).

Det elektropneumatiska systemet är snabbare och effektivare än det pneumatiska. Ett elektropneumatiskt bromssystem fungerar så att en elektrisk bromskontroll skickar elektriska signaler till drivfordonets förarbromsventil samt till övriga fordons styrventiler (se figur 2.4-8). Alltså får alla fordon i tåget den elektriska signalen om bromsning samtidigt så tillsättningstiden blir samma oberoende på antal fordon och tåglängd (Andersson & Berg 2007).



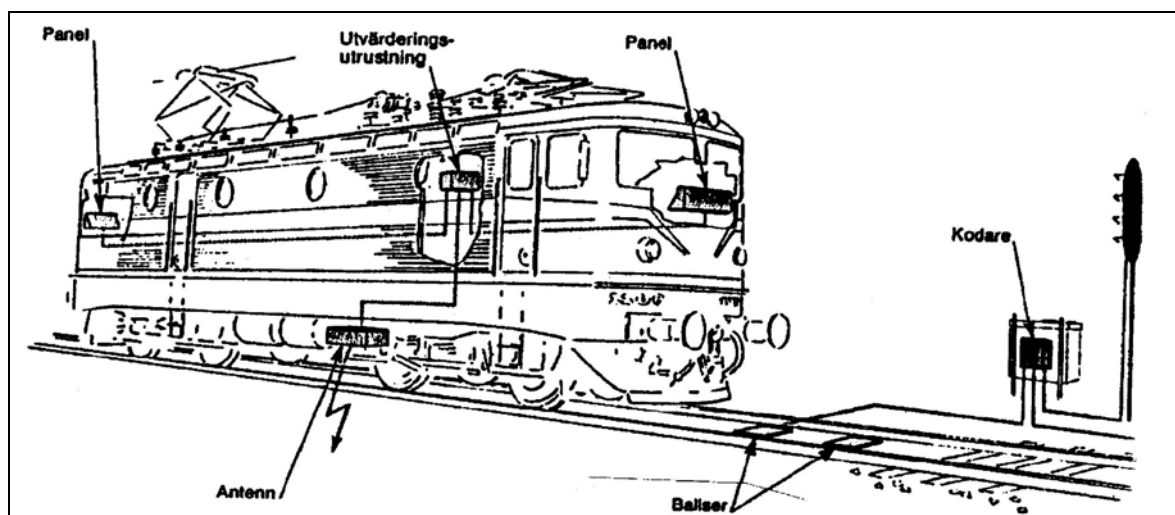
**Figur 2.4-8** Uppbyggnad av ett el-pneumatiskt bromssystem (Andersson & Berg 2007)

### 2.4.3 ATC system

Ett ATC-system, vilket står för Automatic Train Control, är ett hastighets- och signalövervakningssystem. Systemet har i huvudsak två uppgifter, att ge tåget och dess förare information om gällande och kommande hastigheter, signalbesked och avståndet till dessa samt att övervaka tågets hastighet och inbromsningskurvor och vid behov ingripa med bromsning då de överskrids. Retardationer där ATC övervakar utifrån inbromsningskurvor benämns vidare i examensarbetet som ATC-övervakade retardationer.

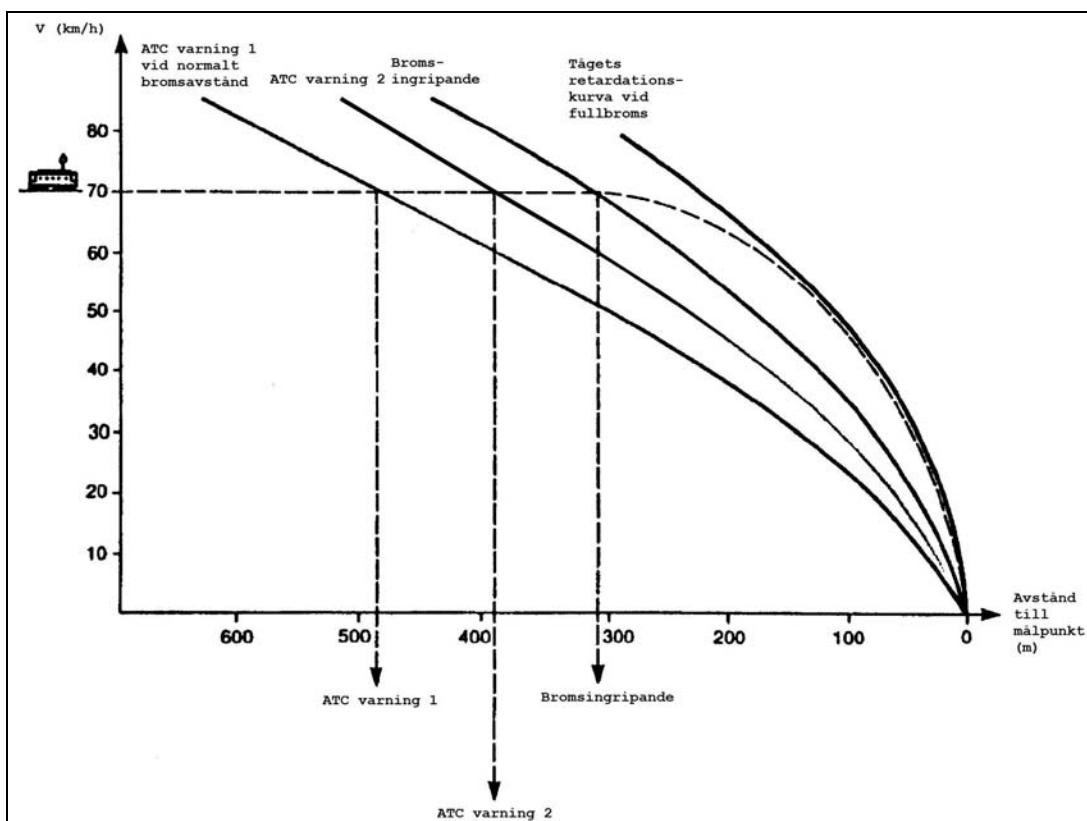
Systemet består av olika komponenter vilka placeras dels i fordonet och dels på banan. Den fordonsplacerade utrustningen är antenn, dator (utvärderings- och styrutrustning) och presentationspanel medan den banplacerade utrustningen består av baliser och kodare (se figur 2.4-9).





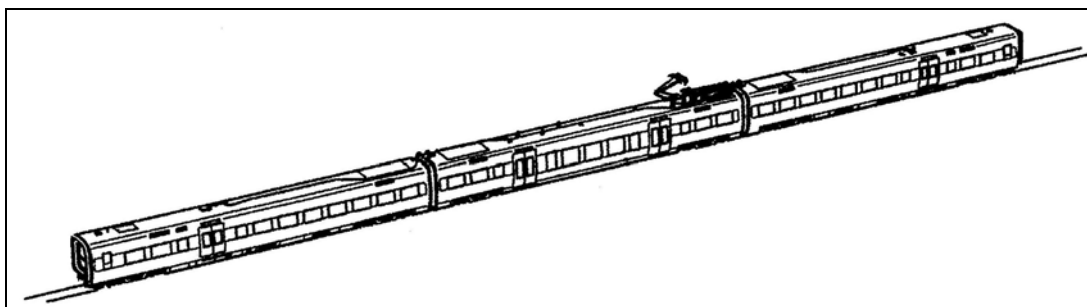
Figur 2.4-9 ATC-systemets komponenter (Andersson & Berg 2007)

All information till fordonet överförs med radiovågor från baliser. Informationen består av tillåten hastighet, kommande hastighet, procentuellt hastighetsöverskridande, målavstånd samt lutning. På fordonet kan föraren mata in kompletterande information om fordonet som sth, retardationsförmåga, bromstillställningstid, tåglängd och procentuellt hastighetsöverskridande. All information bearbetas och utvärderas i ATC-datorn, vilken räknar ut bromskurvor och presenterar information till föraren via panelen (se figur 2.4-10). Bromskurvorna är ATC-datorns referens för ett eventuellt bromsingripande. ATC-datorn består även av en registreringsutrustning vilken är tågets "svarta låda" (Andersson & Berg 2007).



Figur 2.4-10 ATC-systemets bromsreferenskurvor (Andersson & Berg 2007)

#### 2.4.4 Teknisk data fordon X31 – Öresundståg



Figur 2.4-11 Öresundståg X31, en OTU (Bombardier 2003)

Öresundståget består av tre vagnar varav de två ändvagnarna är identiska (spegelvända) (se figur 2.4-11). De två vagnar som är placerade i ändarna är motorvagnar med vardera två drivande boggiar. Vagnen i mitten (mellan motorvagnarna) är en löpvagn utan drivsystem. Denna fordonssammansättning kallas OTU, Öresund Train Unit. Maximalt fem OTU kan kopplas samman vid så kallad multipeldrift. Öresundstågets traktionssystem är av typen B4 i figur 2.3-1, vilket består av 3-fas traktionsmotorer. Uppstyrningen av motorströmmen sker automatiskt av fordonet utifrån av föraren inställd börshastighet (Bombardier 2003).

Bromssystemet är el-pneumatiskt och består av tre olika bromsprinciper, friktionsbroms av typen skivbroms, elektrisk broms samt magnetskenbroms. Eftersom fordonet inte har en luftburen huvudledning finns istället en elektrisk krets med samma funktion, den så kallade *säkerhets slingan*. Fordonet är utrustat med kombinerat svenskt (ATSS) och danskt (Siemens) ATC-system, vilka innehåller utrustning för att registrera och lagra ett antal parametrar vid körning. I det svenska systemet kallas denna utrustning registreringsenhet vilken är integrerad i ATC-datorn och i det danska systemet är utrustningen separat och kallas haverilogg (DLU – Data Logging Unit) (Bombardier 2003).

Fordonsdata:

Längd över koppel: 78,9 m

Tomvikt: 153 ton

Drivsystem: 8 st 3-fas asynkronmotorer, IGBT tyristerströmriktare

Driftspänning: Sverige 15 kV 16 $\frac{2}{3}$  Hz, Danmark 25 kV 50 Hz

Max kontinuerlig effekt: 2300 kW

Max hastighet: 180 km/h

Max dragkraft: 170 kN

Max acceleration: 0,87 m/s<sup>2</sup>

Medelretardation driftbroms: 0,8 m/s<sup>2</sup>

Medelretardation nödbroms: 1,2 m/s<sup>2</sup> varav 0,2 m/s<sup>2</sup> magnetskenbroms

Bromsprocent: 170 % (se kap 2.5.5 Bromskraft)

(Bombardier 2003)

#### 2.4.5 Teknisk data fordon Rc-lok och vagnar



**Figur 2.4-12** Rc-lok med resandevagnar  
(<http://www.jarnvag.net>)

Rc-loket är Sveriges vanligaste loktyp och finns i olika varianter. Rc1 till Rc6 är deras littera. Största skillnaden mellan dessa är utväxlingsförhållandet dvs loken är växlade för olika sth. Rc3 och Rc6 som är växlade för sth 160 *km/h* används huvudsakligen till resandetåg (se *figur 2.4-12*) och resten av loken som är växlade till 135 *km/h* används till godståg (se *figur 2.4-13*) med undantag för posttåg som dras av Rc3. Ett lokdraget tåg består av dels lok som är det enda drivande fordonet och dels vagnar som inte är drivande men utrustade med bromsar. Rc-loket går även att köra i multipeldrift med flera lok för att erhålla högre dragkraft vid höga tågvikter. Rc-lokets traktionssystem är av typen B3 i *figur 2.3-1*, vilket består av likströmsmotorer. Uppstyrningen av motorströmmen regleras helt av föraren via reglage. Bromssystemet är pneumatiskt med luftburen huvudledning och består av friktionsbroms av typen skivbroms och blockbroms. Fordonet är utrustat med svensk ATC med registreringsenhet (Sjöborg 2000).



**Figur 2.4-13** Rc-lok med godsvagnar  
(<http://www.jonaryd.rondelen.se>)

Vagnar finns i hundratals olika utformningar beroende på funktionskrav och lasttyp. Generellt är resandevagnar konstruerade för högre hastigheter (160 *km/h*) jämfört med godsvagnar. Undantaget är postvagnar som är av personvagnstyp. Bromssystemen är pneumatiska med luftburen huvudledning och för resandevagnar även luftburen matarledning. Bromsprincipen är av typen friktionsbroms, där godsvagnar nästan uteslutande är utrustade med blockbromsar. Resandevagnar är utrustade med antingen blockbroms eller skivbroms (Andersson & Berg 2007).

## Fordonsdata Rc-lok

Längd mellan buffertar: 15,5 m

Totalvikt: 78 ton

Dynamisk vikt: 89 ton (se 2.5.2 Ekvivalent massa)

Drivsystem: 4st separatmagnetiserade likströmsmotorer, tyristorströmriktare

Driftspänning: 15 kV 16 $\frac{2}{3}$ Hz

Effekt: 3600 kW

Max hastighet: Rc3,6 160 km/h, övriga 135 km/h

Dragkraft: 175 kN

Bromsprocent: Bromsläge G = 95 % , P = 97 % , R = 123 %

(Sjöborg 2000)

## 2.5 Kraft och rörelse

Alla typer av accelerationer och retardationer av spårfordon bygger på ett komplext samspel mellan olika fysikaliska krafter. Generellt för tåg är att den kraftöverföring som behövs för accelerationer respektive retardationer sker mellan hjul och räl. De viktigaste fysikaliska förutsättningarna för kraft och rörelse presenteras i detta kapitel.

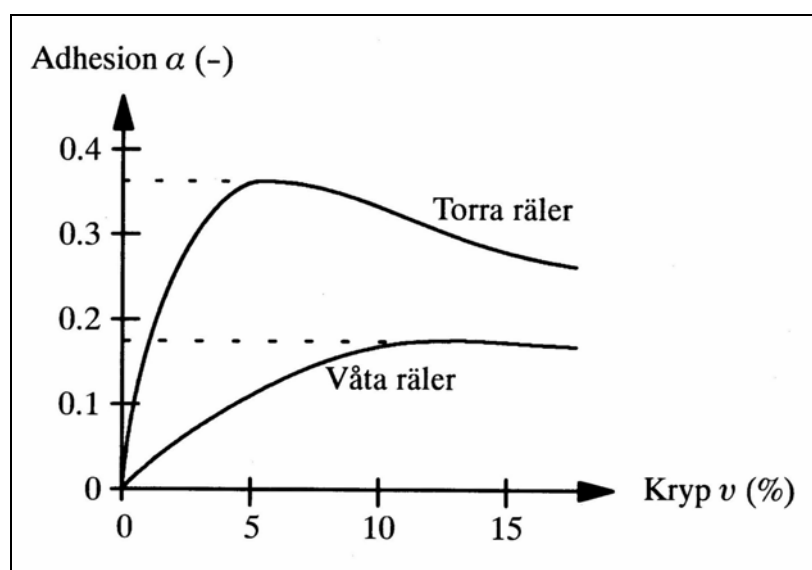
### 2.5.1 Adhesion

För att ett drivfordon skall kunna accelerera eller retardera krävs överföring av drag- och bromskrafter mellan hjul och räl. Adhesion betyder vidhäftning mellan hjul och räl (KTH Järnväggruppen, 2008) och är inom järnvägstekniken ett samlat begrepp för att beskriva hur stora drag- och bromskrafter som är möjliga att överföra via tillgänglig friktion mellan drivhjul och räl utan att slirning eller låsning av hjulen inträffar. Andra vanligt förekommande benämningar för adhesion är *uttagbar adhesion* eller tillgänglig adhesion. Adhensionsbegreppet definieras genom adhesion, adhesionsvikt och *adhensionsutnyttjningskoefficient* (Andersson & Berg 2007). Adhensionsvikt är den totala massa som vilar på samtliga drivande hjul på ett tåg. Vid retardation är motsvarande benämning *bromsvikt* (Andersson & Berg 2007). Hur stor den tillgängliga adhesionen är beror bland annat på fysikaliska faktorer som slirningsgrad (även kallat kryp), hastighet, lastvariation och eventuella föroreningar i kontaktytan mellan hjul och räl. Andra faktorer som kan påverka den tillgängliga adhesionen är t ex om fordonet är utrustat med något system som kan hantera en begynnande slirning eller en fastlåsning av hjul (Andersson & Berg 2007).

Med ökad hastighet tenderar adhesionen att minska. Orsaken är att kontakten mellan hjul och räl minskar på grund av bland annat ojämnheter i både hjul

och räl. Även föroreningar (vatten, olja, fett eller en mix av dessa) i kontaktytan mellan hjul och räl medför att adhesionen minskar med ökad hastighet (Andersson & Berg 2007).

De största adhesionsvärdena erhålls vid torra, rena kontaktytor mellan hjul och räl och kan bli så stora som 0.30-0.40 (dimensionslös storhet). Sämst förutsättning för adhesion ges vid så kallad lövhalka och kan generera så låga adhesionsvärde som 0.01-0.05. För vägfordon (kontakten mellan gummi-hjul och asfalt) kan på torrt underlag adhesionen ligga på ett värde mellan 0.5 och 0.8. I de flesta fall understiger inte adhesionen 0.2 (Andersson & Berg 2007).

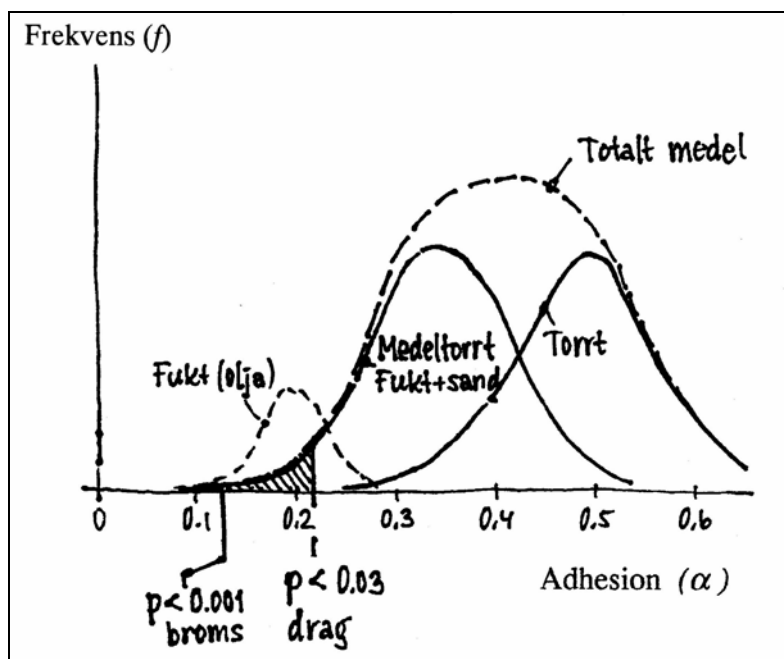


**Figur 2.5-1** Exempel på adhesionskurvor som visar hur den uttagbara adhesionen varierar mellan torra respektive våta räler (Andersson & Berg 2007)

Friktionen mellan hjul och räl brukar beskrivas med en *friktionskoefficient* (se kap 2.6.5 *Bromskrafter*). Förhållandet mellan tillgänglig adhesion respektive adhesionsutnyttjningskoefficienten och friktionskoefficienten är att den förstnämnda alltid är mindre än den sistnämnda (Andersson & Berg 2007).

Tillgänglig adhesion förändras både med variationer i banan och med tiden. Den faktiska adhesionen är starkt beroende av tidigare nämnda faktorer men också av de förutsättningar som tåget och banan har vid en given tidpunkt (Andersson & Berg 2007).

Adhesion kan sägas uppträda med en viss sannolikhet. Sannolikhetsfördelningen för den tillgängliga adhesionen kan ses som en sammanslagning av varje separat sannolikhetsfördelning för alla de fysikaliska och tekniska faktorer som råder vid en given tidpunkt för ett givet tåg (Andersson & Berg 2007).



Figur 2.5-2 Samband mellan adhesion och sannolikhet över tid, längs ett godtyckligt banavsnitt (Andersson & Berg 2007)

## 2.5.2 Ekvivalent massa

Ekvivalent massa,  $m_e$ , är enligt definition summan av alla i ett fordon ingående massor med tillägg för roterande massors masströghet. Ekvivalent massa benämns ofta *dynamisk massa* eller dynamisk vikt. Den ekvivalenta massan tar hänsyn till de effekter som ett fordon's roterande massor har vid acceleration och retardation. Roterade massor utgörs av hjul, hjulaxlar, bromsskivor samt alla olika drev och kugghjul i motorer och dylikt. När ett fordon accelererar eller retarderar påverkas både färdhastighet och rotationshastighet på fordonets roterande delar.

Detta framgår ur ekvationen för rörelseenergi (kinetisk energi) vilken beräknas som summan av färdhastighetens och de roterande massornas rörelseenergi. En närmare redogörelse av ekvivalent massa ges i bilaga 1 (Andersson & Berg 2007).

## 2.5.3 Gångmotstånd

Gångmotstånd,  $D$  är ett samlingsnamn på de olika typer av motstånd som finns och motverkar ett tågs rörelser i en given färdriktning. Gångmotståndet brukar delas upp i *mekaniskt motstånd*, *kurvmotstånd*, *luftmotstånd* och *stigningsmotstånd* (Andersson & Berg 2007).

*Mekaniskt motstånd*,  $D_M$  på rakspår uppkommer både inom ett fordon och i samverkan mellan fordonet och spåret. I själva fordonet uppkommer motstånd

i form av friktion i lager, energiförluster i drivfordons transmission och fjädringssystem.

I samverkan mellan fordon och spår uppkommer motstånd framförallt genom kryprörelser och friktion mellan hjul och räl.

Det mekaniska motståndets påverkan på tågets rörelse minskar med ökad hastighet. Det största mekaniska motståndet uppstår som startmotstånd när ett tåg från stillastående skall sättas i rörelse. Startmotståndet är ungefär dubbelt så stort som det mekaniska motståndet på rakspår för tåg i rörelse (Andersson & Berg 2007).

*Luftmotstånd*,  $D_L$  är ett samlingsnamn för de aerodynamiska fenomen som uppstår i samband med framförandet av tåget. Några av de parametrar som används vid beräkning av luftmotstånd är tågets hastighet, tågets tvärsnittsarea, *luftmotståndskoefficient*  $C_D$  samt tågets längd.

Luftmotståndskoefficienten beskrivs som en funktion av tågets *tryckmotståndskoefficient*  $C_p$ , *längdmotståndskoefficienten*  $C_L$  och tågets längd. Luftmotståndet ökar med stigande hastighet och är av störst betydelse vid höghastighetstrafik. Vid godstrafik uppkommer det en del luftmotstånd vid drift och då oftast beroende på öppna mellanrum mellan vagnar eller otäckta vagnar (Andersson & Berg 2007).

*Kurvmotstånd*,  $D_K$  uppträder genom glidningar mellan hjul och räl i kurvor. Kurvmotståndet är starkt förknippat med den radialstyrning som ett hjulpar med stel axel har genom en kurva. Då hjulens konicitet inte kan kompensera för skillnaden mellan längden för ytter- respektive innerräl i en kurva uppstår kurvmotstånd genom friktion i hjulens löpbanor och i de hjulflänsar som ligger i kontakt med rälen (Andersson & Berg 2007).

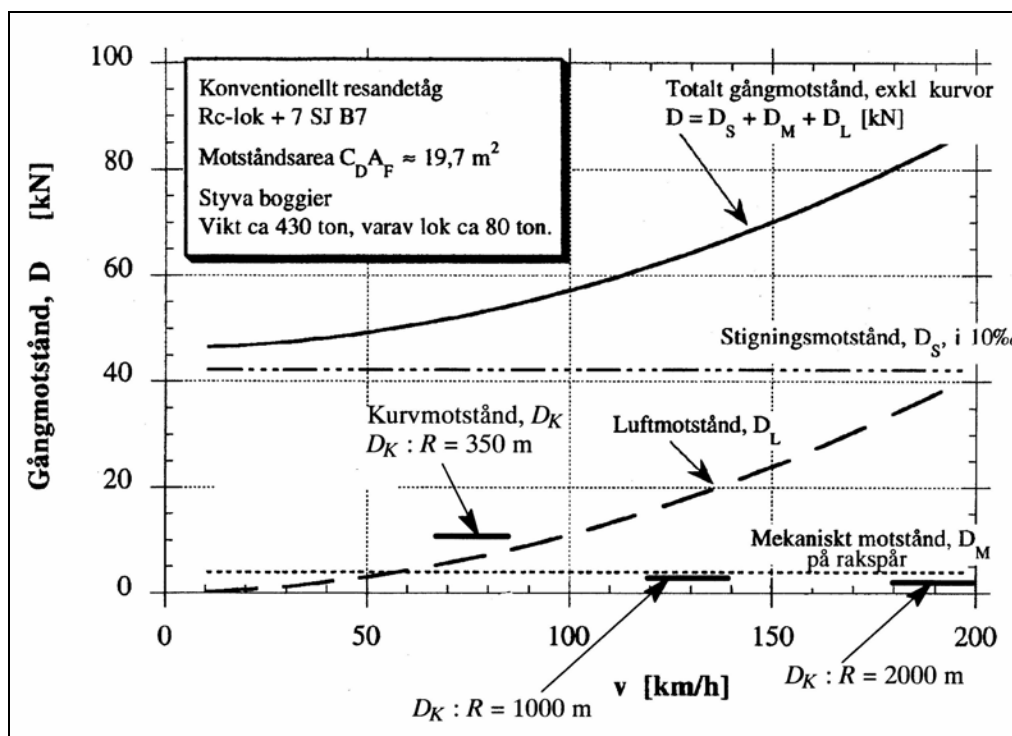
*Stigningsmotstånd*,  $D_S$  uppkommer eftersom tyngdkraftens komponent i spårets riktning verkar på tåget i stigningen. Det är framförallt långa och tunga godståg som påverkas mest av stigningsmotståndet (Andersson & Berg 2007).

Det totala gångmotståndet ges som summan av mekaniskt motstånd, luftmotstånd, kurvmotstånd och stigningsmotstånd.

$$D = D_M + D_L + D_K + D_S \quad [kN] \quad (2-1)$$

Det totala gångmotståndet ökar med stigande hastighet vilket framgår ur *figur 2.5-3* nedan (Andersson & Berg 2007).





Figur 2.5-3 Exempel på beräknat gångmotstånd som funktion av hastighet (Andersson & Berg 2007)

När gångmotståndet skall beräknas i praktiska tillämpningar används oftast *Dauids Formel*. Simuleringsprogrammet *OpenTrack* använder *Dauids* formel för gångmotståndsberäkningar (Hellström 2009). *Dauids* formel beskriver ett tågs mekaniska och aerodynamiska gångmotstånd ( $D_{ML}$ ) som en funktion av hastigheten enligt:

$$D_{ML} = A + Bv + Cv^2 \quad [\text{kN}] \quad (2-2)$$

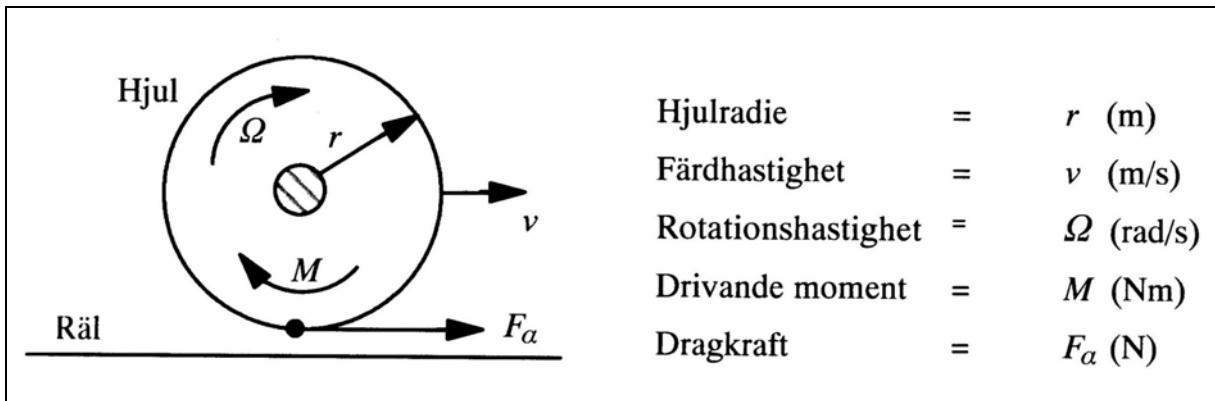
De okända koefficienterna  $A$ ,  $B$  och  $C$  varierar beroende på fordonstyp, spårets egenskaper och samverkan mellan hjul och räl. Det mekaniska motståndet för ett givet fordonssätt, varierar beroende på hastighet, antal vagnar och hjulaxlar, typ av spår (för godstrafik eller persontrafik) samt axellast och innefattas i termerna  $A$  och  $Bv$  i *Dauids* formel.

*Aerodynamiska motståndet* ( $D_L$ ), innefattas i den kvadratiska termen  $Cv^2$  (Lukaszewicz 2001).

#### 2.5.4 Dragkraft

För att sätta ett tåg i rörelse behövs en accelererande dragkraft,  $F_\alpha$ . För att kunna utnyttja denna dragkraft måste den överföras från tågets drivhjul till rälen och däremellan behöver det även ske en viss glidning (slirning). Glidning uppstår då hjulets rotationshastighet är något större än vid en ren rullning. Storleksbehovet på dragkraften är beroende av tågvikten som skall

drivas och vilket gångmotstånd ( $D$ ) som behöver övervinnas. Hur stor dragkraft som är möjlig att ta ut beror dels på drivfordonets möjlighet att generera dragkraft men också på den tillgängliga adhesion (se kap 2.5.1 *Adhesion*) som kan tas ut under rådande förhållande. Då dragkraften överstiger den tillgängliga adhesionen uppkommer slirning mellan drivhjul och räl. Ju högre dragkraft ett drivfordon alstrar ju högre måste adhesionsvikten vara för att slirning inte skall ske. I figur 2.5-4 ges en schematisk bild av en framdrivning (Andersson & Berg 2007).



Figur 2.5-4 Schematisk bild över ingående parametrar vid drivning av ett hjul (Andersson & Berg 2007)

Dragkraften beräknas ur följande samband:

$$F_\alpha = \frac{M}{r} - D \quad [kN] \quad (2-3)$$

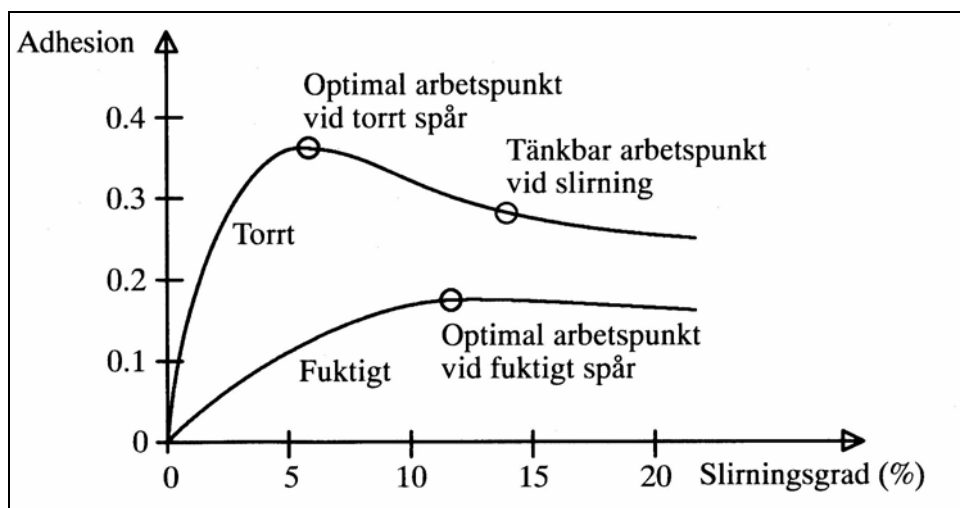
där kvoten  $\frac{M}{r}$  är den nominella kraft  $F$  som motsvarar den faktiska dragkraft som sätter tåget i rörelse.

Genom att sätta samman ekvationerna (2-1) och (2-3) erhålls den nominella dragkraften enligt:

$$F = F_\alpha + D = F_\alpha + D_M + D_L + D_K + D_S \quad [kN] \quad (2-4)$$

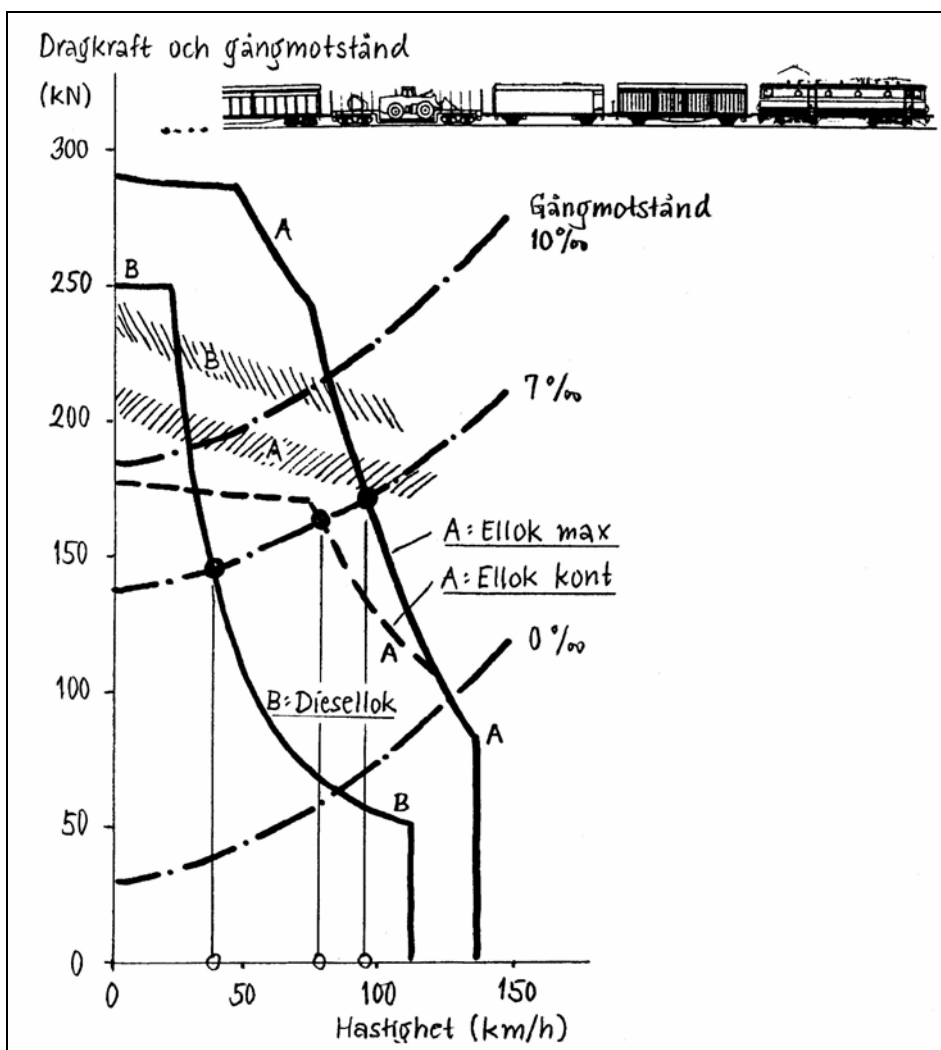
(Andersson & Berg 2007)

Dragkraften som kan utnyttjas är som störst vid en viss slirningsgrad för en given adhesionsnivå. Detta kan beskrivas genom så kallade *adhesionskurvor* där adhesionen ges som funktion av slirningsgraden för olika friktionsförhållanden vilket framgår ur figur 2.5-5 nedan (Andersson & Berg 2007).



*Figur 2.5-5 Adhensionskurvor med markering av slirningspunkter för torra respektive våta räler (Andersson & Berg 2007)*

Med ökad hastighet minskar det möjliga utnyttjandet av dragkraften hos ett givet drivfordon. Detta beror dels på effektbegränsningar i traktionen men också på att tillgänglig adhesion minskar med ökad hastighet (se *kap 2.5.1 Adhesion*). Olika drivfordons maximala dragkrafter är kända och kan beskrivas i ett dragkraftsdiagram. *Figur 2.5-6* nedan visar den dragkraft som drivfordonet kan alstra vid hjulperiferin samt sambandet mellan jämviktshastighet och olika stigningar. När jämviktshastighet nås försvinner också dragkraftsöverskottet och ingen ytterligare acceleration är möjlig (Andersson & Berg 2007).



**Figur 2.5-6** Exempel på dragkraftdiagram som beskriver dragkraft och gångmotstånd som funktion av hastighet. Ungefärlig adhesionsgräns anges som streckade område i figuren. (Andersson & Berg 2007)

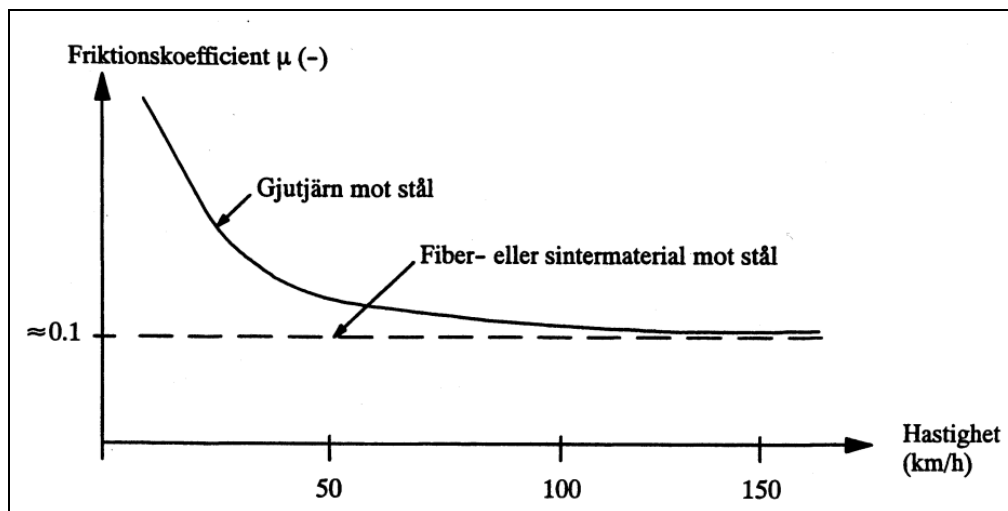
### 2.5.5 Bromskraft

Bromskrafter kan alstras enligt tre olika principer, nämligen: adhesion mellan hjul och räler, friktion mellan glidsko och räl samt virvelströmsbroms just ovanför räl. Vanligast är den adhesionsberoende bromsen vilket innefattar både skiv- och blockbroms. Gemensamt för alla adhesionsberoende bromsar är att det måste uppstå en glidning (kryp) mellan hjul och räl för att en bromskraft skall alstras. Krypnet mellan hjul och räl vid en retardation uppstår eftersom hjulens rotation är något långsammare än tågets hastighet (Andersson & Berg 2007).

En retardation av ett fordon med t.ex. blockbroms innebär att ett bromsande moment läggs på hjulen med hjälp av bromsblock (se kap 2.4.2 *Bromssystem*). Till följd av detta skapas en adhesionsberoende bromskraft mellan hjul och räl

som tillsammans med befintligt gångmotstånd skapar en retardation av fordonet (Andersson & Berg 2007).

Bromskraftens storlek vid en retardation med t.ex. blockbroms är också beroende på friktionen mellan bromsblock och hjulets löpbana. Friktionen är starkt hastighetsberoende och varierar mellan olika hastigheter där minskad hastighet medför ökad friktion (se *figur 2.5-7*) (Bergstedt 2005).



*Figur 2.5-7* Friktionskoefficienten  $\mu$  som funktion av hastigheten. (Bergstedt 2005)

När beräkningar av olika bromsstorheter (*bromstid* (se *kap 2.6.3 Tillsättningsförlopp*), bromssträcka mm.) för olika fordon utförs i praktiken, sker det genom ett förenklat beräkningsförfarande där begreppen bromsvikt och bromsprocent används. Bromsvikten ( $B_T$ ) för ett tåg motsvarar den totala bromsvikten för samtliga fordon i tåget och anger ett förenklat mått på dess retardationsförmåga. Ökad bromsvikt medför ökad retardationsförmåga. Bromsvikten relateras till de olika bromsgrupper R, P och G (se *kap 2.4.2 Bromssystem*). Bromsprocenten ( $\lambda_T$ ) för ett tåg definieras som kvoten mellan tågets bromsvikt och dess ekvivalenta massa ( $m_{eT}$ ), enligt:

$$\lambda_T = \frac{B_T}{m_{eT}} 100 \quad [ \% ] \quad (2-5)$$

Här står indexeringen  $T$  för tåg.

Bromsprocenten motsvarar den möjliga retardationsförmåga som ett tåg med given bromsvikt och ekvivalent massa har (Andersson & Berg 2007).

## 2.6 Gångtidsberäkningar

Kapitlet behandlar gångtider och belyser vikten av att ta hänsyn till tillsättnings- och lossningstid vid beräkning av retardations- och accelerationssträcka.

### 2.6.1 Gångtider

En gångtidsberäkning genomförs ofta med olika förenklade antagande om konstant acceleration och retardation. Detta medför att både tid och sträcka för acceleration och retardation kan beräknas med enkelt uttryckta formler.

I realiteten sker en acceleration eller retardation av ett fordon mycket sällan linjärt. Det normala är att dragkraften och bromsverkan varierar kontinuerligt under hela förloppet. För att hantera gångtidsberäkningar med varierande accelerationer och retardationer används idag ofta någon form av numerisk integration (Andersson & Berg 2007).

### 2.6.2 Tillsättningsförlopp vid en retardation – Ett exempel

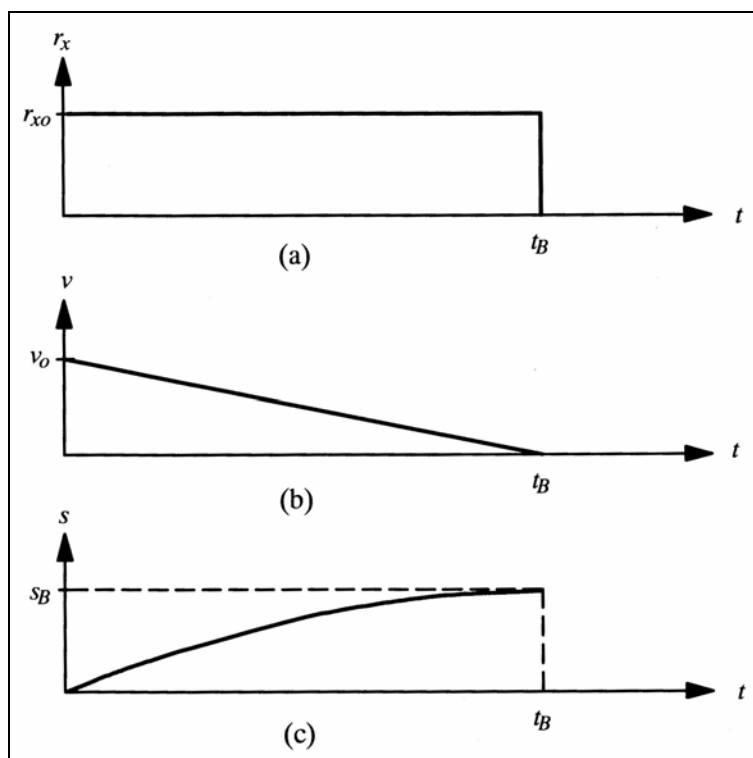
Bromstiden  $t_B$  är den tid det tar för ett fordon att bromsa från en given hastighet ner till noll. På motsvarande sätt anger bromssträckan  $s_B$  den sträcka som ett fordon behöver för att bromsa från en given hastighet ner till noll (Andersson & Berg 2007).

I den enklaste formen (se *figur 2.6-1*) ges bromstiden som kvoten mellan utgångshastigheten  $v_o$  och den *konstanta retardationen*  $r_{x0}$  enligt:

$$t_B = \frac{v_o}{r_{x0}} \quad [s] \quad (2-6)$$

För bromssträckan gäller:

$$s_B = \frac{v_o^2}{2r_{x0}} \quad [m] \quad (2-7)$$



**Figur 2.6-1** Exempel på bromsning med konstant retardation.  
 (a) konstant retardation, (b) linjär hastighetssänkning  
 (c) bromssträckeran  
 (Andersson & Berg 2007)

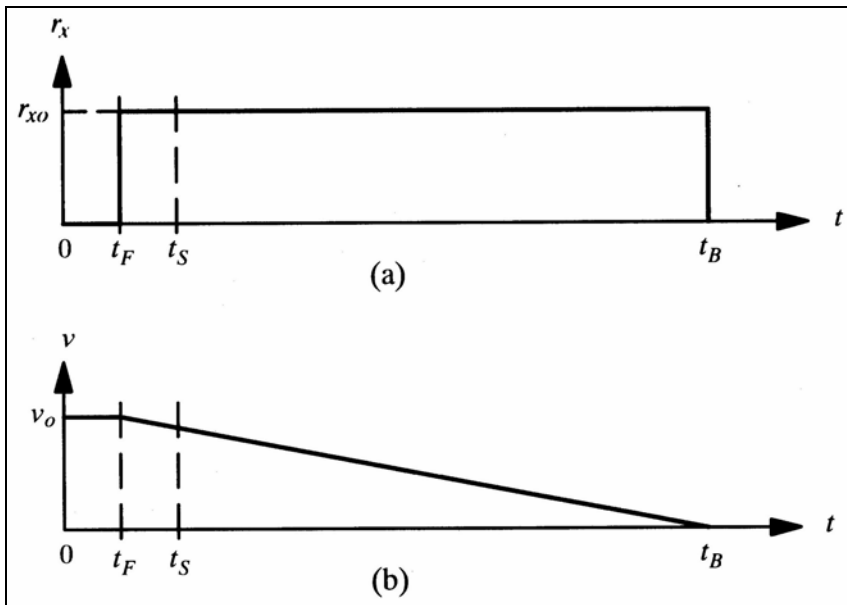
Vid en verklig bromssituation finns det en tidsfördröjning mellan tillsättning av bromsen till dess att full bromsverkan erhålls. Denna fördröjning benämns bromsens tillsättningsförlopp och tas inte med i det förenklade beräkningssättet i (2-6) och (2-7). För att kompensera detta införs tidsfördröjningen  $t_F$  (se figur 2.6-2) där bromsverkan antas öka linjärt med tillsättningstiden,  $t_s$  och beskrivs genom:

$$t_F = \frac{t_s}{2} \quad [s] \quad (2-13)$$

Genom att använda sambandet (2-13) med (2-11) och (2-12) kan en noggrannare beskrivning av bromstid och bromssträcka göras, enligt:

$$t_B = t_T v_o + \frac{v_0^2}{r_{x0}} \quad [s] \quad (2-14)$$

$$s_B = t_T v_o + \frac{v_0^2}{2r_{x0}} \quad [m] \quad (2-15)$$



**Figur 2.6-2** Bromsning med tidsfördröjning  $t_F$ .  
 (a) fördröjd retardation, (b) fördröjd hastighetssänkning  
 (Andersson & Berg 2007)

(Andersson & Berg 2007)

Nedanstående exempel belyser vikten av att tillsättningsförloppet tas med vid beräkningar av bromstid och bromssträcka för t.ex. ett Öresundståg - X31.

Fordonsdata X31

Medelretardation (konstant) driftsbroms  $r_{xo} = 0.8 \text{ m/s}^2$

Tillsättningstid (enligt ATC föreskrifter)  $t_s = 5 \text{ s}$

Utgångshastigheten  $v_0 = 180 \text{ km/h} = 50 \text{ m/s}$

**Fall 1:** Bromstiden och bromssträckan beräknas utan hänsyn till bromsens tillsättningsförlopp

$$t_{B\_Fall\_1} = \frac{50}{0.8} = 62.5 \text{ s}$$

$$s_{B\_Fall\_1} = \frac{50^2}{1.6} = 1562 \text{ m}$$

**Fall 2:** Bromstiden och bromssträckan beräknas med hänsyn till bromsens tillsättningsförlopp

$$t_{B\_Fall\_2} = 2.5 + \frac{50}{0.8} = 65.0 \text{ s}$$



$$s_{B\_Fall\_1} = 2.5 \cdot 50 + \frac{50^2}{1.6} = 1687 \text{ m}$$

I exemplet framgår att bromssträcken förlängs med 125 meter när hänsyn för tillsättningsförloppet av bromsningen tas.

Även om räkneexemplet behandlat tillsättningsförloppet för en bromsning så finns motsvarande effekter att ta hänsyn till när det gäller lossningsförloppet.

## 3 Simuleringar

Kapitlet behandlar inställningarna i simuleringssverkyget OpenTrack samt resultatet av gjorda grundsimuleringar.

### 3.1 Beskrivning av simuleringssmodellen

Modellen som ligger till grund i examensarbetet baseras på en verklig sträcka på Västkustbanan mellan Landskrona och Lund. Sträckan är cirka 17 km lång och innehåller en driftplats Kävlinge samt två hållplatser på linjen: Dösjebro och Gunnesbo. Anledningen till att denna sträcka valdes är dels att den använts vid tidigare simuleringar (vid Vectura) med X31 men också för att den representerar en godtycklig stäckning avseende radier, lutningar, sth mm. För det andra trafikeras den idag av Öresundstågen. Sträckan lämpar sig även för andra fordon som t.ex. Rc-lokdragna tåg. Hastigheten på sträckan begränsas endast av fordonens sth förutom i Kävlinge där en nedsättning till 140 km/h finns för våra undersökta tågtyper. För att simulera lägre hastigheter har en tillfällig hastighetsnedsättning på sträckan modellerats utifrån simuleringssbehov.

### 3.2 Grundinställningar i simuleringarna

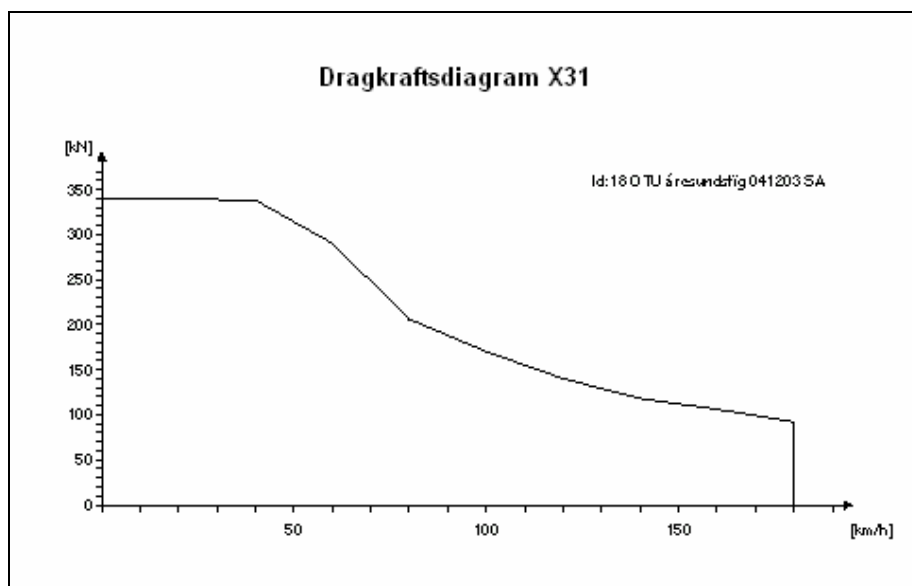
Enligt syftet skall arbetet behandla de simuleringar som för närvarande genomförs med OpenTrack. Kapitlet ger en kort presentation av de olika grundinställningarna som för närvarande används i OpenTrack.

#### 3.2.1 Fordon

Fordonen som används i simuleringarna är sådana som använts vid tidigare simuleringar (vid Vectura). De modellerade fordonen är X31 med två sammankopplade OTU med 158 meters längd och ett Rc-lokdraget posttåg med 325 meters längd.

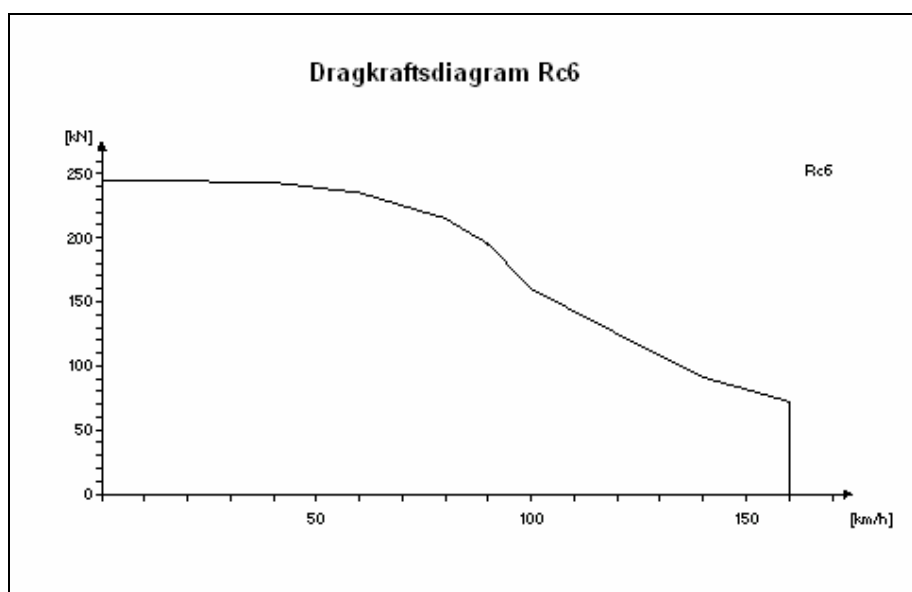
#### 3.2.2 Dragkraft och retardation

De retardationsvärden som används i OpenTrack är hämtade från Banverkets gångtidsprogram (PcGtp) och används som standardvärden vid trafiksimuleringar i Sverige. Den inställda retardationsförmågan för X31 är  $0,83 \text{ m/s}^2$  och retardationen är konstant och inga tillägg för tillsättnings- och lossningstid finns. Dragkraften för X31 är enligt *figur 3.2-1* nedan. Nämnas bör att dragkraften är den dubbla eftersom två OTU är sammankopplade.



*Figur 3.2-1 Dragkraftsdiagram X31 från OpenTrack*

Retardationsförmågan för posttåget är  $0,65 \text{ m/s}^2$  vilken är konstant utan tillägg för tillsättnings- och lossningstid. Dragkraften för Rc-lok är enligt *figur 3.2-2* nedan.



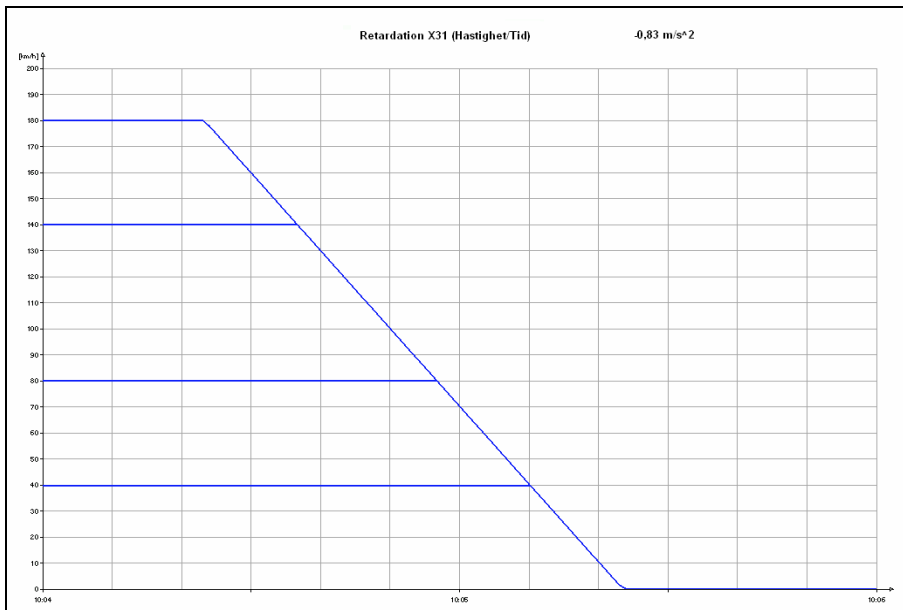
*Figur 3.2-2 Dragkraftsdiagram Rc6 från OpenTrack*

### 3.2.3 Gångmotstånd

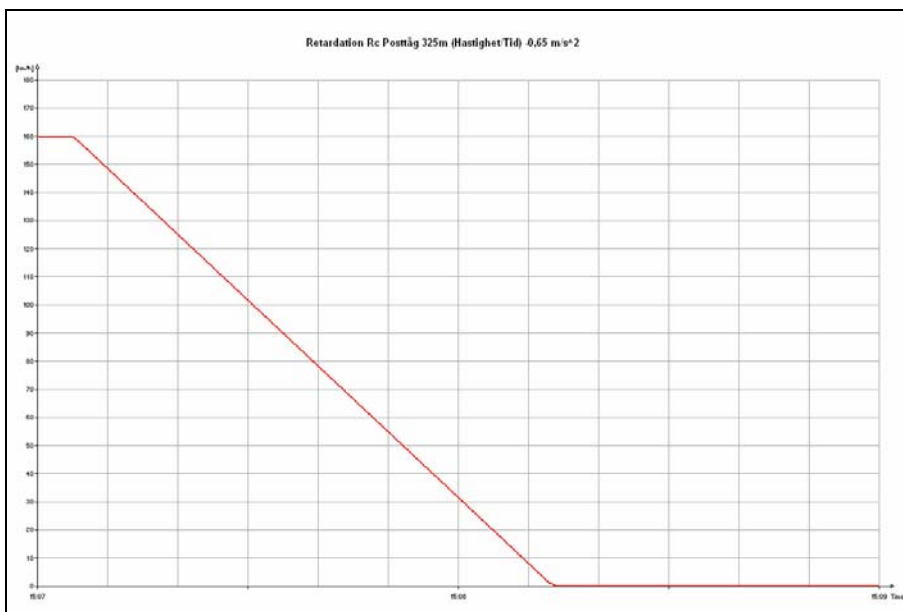
Inställningarna för gångmotstånd varierar för de två olika fordonstyperna. Detta för att det är olika fordonstyper med olika utrustning och utformning och därför olika egenskaper. Inställningarna för X31 enligt Davids formel (se *kap 2.5.3 Gångmotstånd*) är  $A=2$ ;  $B=0,045$ ;  $C=0,00055$  och för Rc-lok  $A=6$ ;  $B=0,045$ ;  $C=0,0012$ .

### 3.3 Sammanställning av grundsimuleringarna

Av resultatet av simuleringarna i OpenTrack framgår att samma retardationsförmåga (den inställda) erhålls vid samtliga retardationer oberoende av vilken hastighet retardationen utgår ifrån (se *figur 3.3-1* samt *3.3-2*). Ingen hänsyn tas till tillsättnings- och lossningstider för bromsen utan full retardation erhålls omedelbart vid bromsning och motsvarande gäller när retardationen upphör. Fordonens inställningar är de som tidigare använts vid simuleringar.

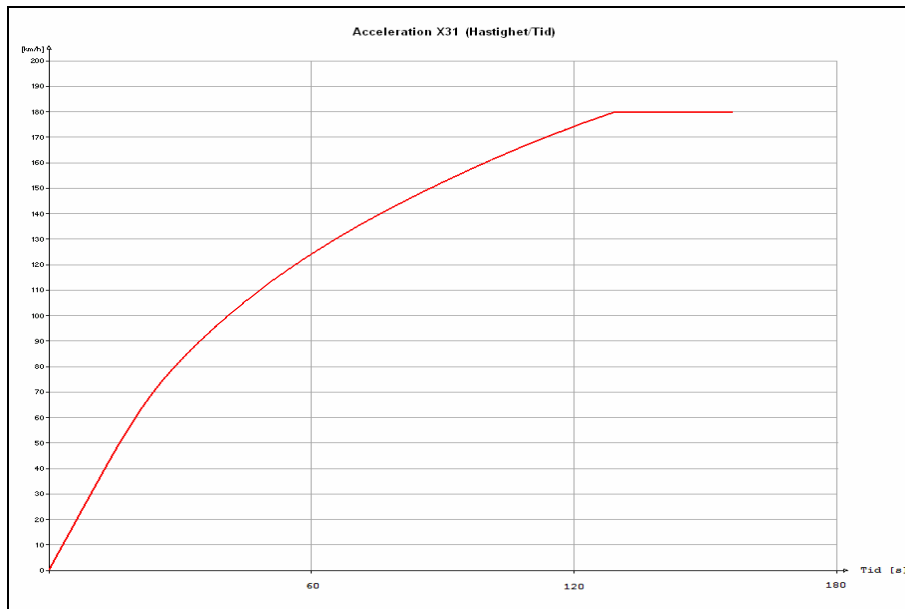


**Figur 3.3-1** Retardation av X31 mot samma mål i olika hastigheter från OpenTrack

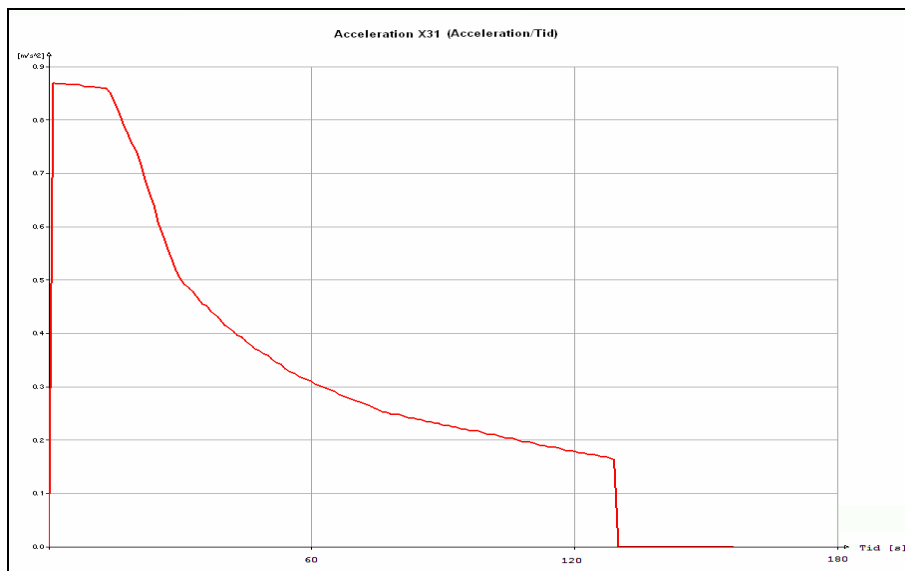


**Figur 3.3-2** Retardation av posttåg från OpenTrack

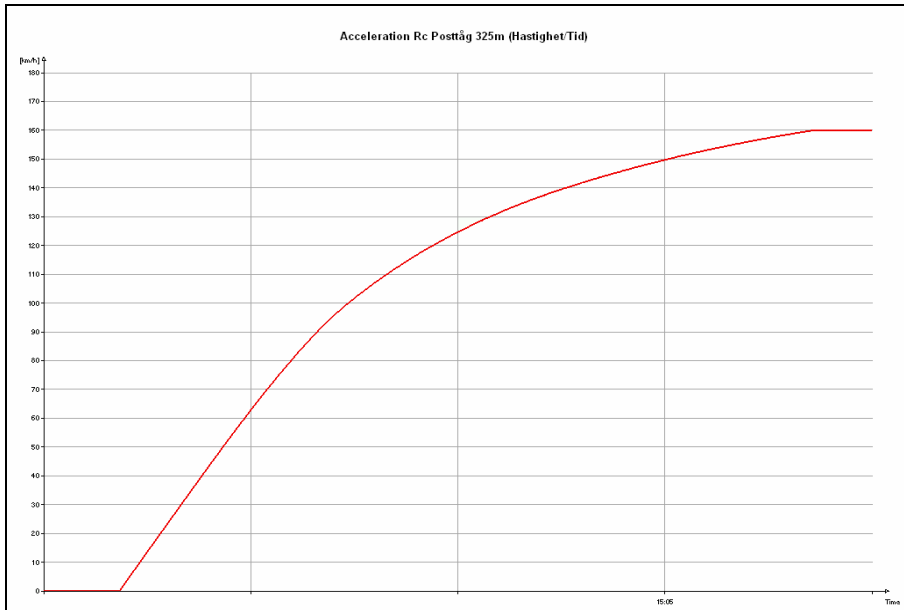
OpenTrack räknar ut fordonets accelerationsförmåga med utgångspunkt från dragkraftsdiagram, tågsvikt och gångmotstånd (se *figur 3.3-3 samt 3.3-5*). Full acceleration erhålls direkt utan någon sorts ”uppstyrningstid” av motorströmmen. På motsvarande sätt sker ”nedstyrningen” av motorströmmen omedelbart utan fördröjningar (se *figur 3.3-4 samt 3.3-6*).



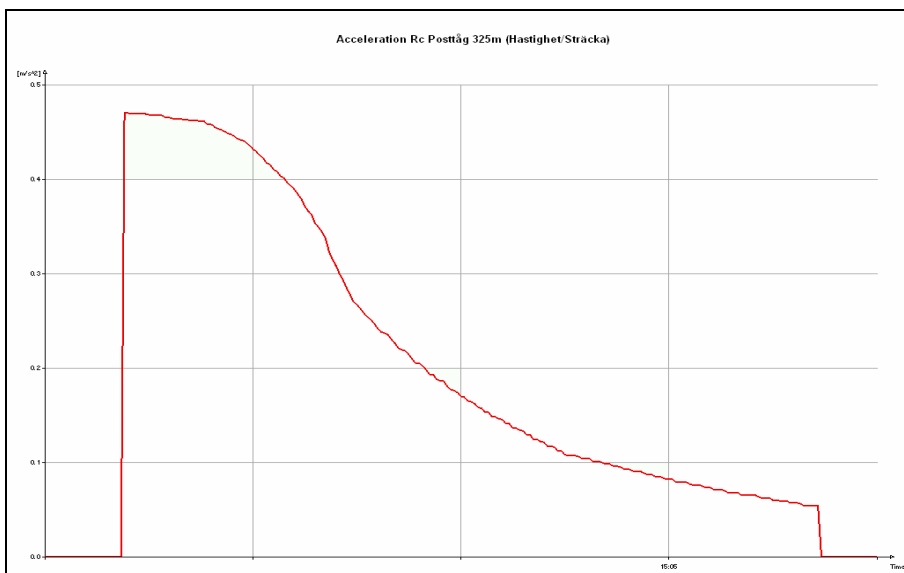
**Figur 3.3-3** Acceleration X31 från OpenTrack



**Figur 3.3-4** Acceleration X31 uttryckt i  $m/s^2$  från OpenTrack



**Figur 3.3-5** Acceleration posttåg från OpenTrack



**Figur 3.3-6** Acceleration posttåg uttryckt i  $m / s^2$  från OpenTrack

### 3.4 Slutsatser kapitel 3

Nedan kommer en sammanställning av de slutsatser som vi kunnat dra utifrån analys av datamaterialet i detta kapitel.

- Konstant retardation oberoende av retardationens utgångshastighet.
- Ingen hänsyn tas till bromsens tillsättnings- och lossningstid (Se *kap 2.4.2 Bromssystem* alternativt *kap 2.6.2 Tillsättningsförlopp*).
- Full acceleration erhålls omedelbart dvs. ingen upp- och nedstyrningstid för motorströmmen finns.

## 4 Fordonsloggar

Fordonsloggar ett viktigt hjälpmedel för att kunna få en realistisk bild av hur ett specifikt fordon beter sig. Genom sammanställning och beräkning av fordonsloggar kan fordonsegenskaper som acceleration, retardation, tillsättnings- respektive lossningstid bestämmas. Fordonsloggarna som används i detta arbete har tillhandahållits av SJ AB och är ATC-loggar för X31 och Rc-lokdragna resandetåg.

### 4.1 Beskrivning av loggning av fordonsdata

ATC-loggningssystemet sparar indata under tre dygn innan de skrivs över med ny data. För att få en förståelse om ATC-loggarnas omfattning består en ATC-logg av ca 1600 stycken excel-ark. ATC-loggarna kan begäras ut av dem som handhar berörda fordon. I normalfallet plockas dessa endast ut vid allvarligare tillbud på fordon eller anläggning för att kunna ge en förklaring av en viss händelse (Andersson 2009).

De ATC-loggar som använts i detta arbete innehåller dels inmatade uppgifter om fordonen såsom längd, topphastighet, retardationsstal och tillsättningsstid dels kontinuerligt uppdaterade uppgifter som körlängd, tid, hastighet, bromstryck, ATC-besked och ATC-kodning. För exempel på utdrag ur fordonslogg, se *bilaga 2*.

På grund av sekretess har SJ AB låtit ta bort vissa uppgifter ur loggarna. Det gäller datum när loggningen har genomförts och vilket tillbud som ligger till grund för uttagning av loggarna. Vidare innehåller ATC-loggarna ingen information om vilka sträckor som loggats. Av denna anledning kan inte resultaten från loggarna ta hänsyn till de varierande geografiska förutsättningarna som gällt (vid loggningstillfället) längs olika järnvägssträckningar (t.ex. kurvor och lutningar) utan kommer endast att ge en allmän bild av fordons- och föraregenskaper.

### 4.2 Behandlande av fordonsloggar

För att kunna hantera fordonsloggarna har en gallring av tillgängliga fordonsdata varit nödvändig. Denna gallring har gällt parametrarna tid, avstånd, hastighet och bromstryck. Genom dessa parametrar kan värden för olika fordonsegenskaper beräknas. Det gäller främst accelerations- och retardationskurvor. En retardation börjar med ett tillsättningsförlopp och avslutas med ett lossningsförlopp. Fordonsloggarna gör det inte möjligt att tilldela föraregenskaper numeriska värden. De ger endast en generell bild av

normalförarens beteende. Anledningen till detta är de retardationer och accelerationer som finns i fordonsloggarna är ett resultat av både fordons- och förarbeteende men är loggade utifrån fordonets beteende (tid, hastighet, avstånd och bromstryck). Det är endast bromstrycket som eventuellt skulle kunna innehålla information om förarbeteendet. Problemet är att det inte framgår vilket bromstryck som avses. Är det faktiskt lufttryck i huvudledning eller är det ett värde för bromscylindertrycket? Detta gör att vi i arbetet valt att låta normalföraren vara inräknad i normalfordonets egenskaper.

För att få en bild av olika fordonsegenskaper kan enkelt uttryckt olika observationer (accelerationer, retardationer, tillsättnings- och lossningsstider) plockas ut ur loggarna helt fristående från varandra och sedan lägesmåttbestämmas genom ett medelvärde. Hur detta genomfördes berodde dels på vilka fordonsloggar som behandlades och dels på vikten av behandlade fordonsegenskaper (framgår av stycke längre ner i kapitlet). För att beräkna en medelretardation har vi använt förfarandet med konstant retardation (se *kap 2.6.3 Tillsättningsförlopp vid en retardation – Ett exempel*).

En viktig fråga är hur många observationer som bör plockas ut ur fordonsloggarna för att kunna dra tillfredställande slutsatser om normalfordon och normalförare. I arbetet finns (som tidigare tagits upp) inget samband mellan vald simuleringsmodell i OpenTrack och de fordonsloggar vi utgått ifrån. Detta gör att genom att plocka ut ett visst antal observationer, jämt fördelade över hela fordonsloggen, kan vi få ett representativt urval för ett normalfordon och en normalförare. Då använd fordonslogg är mycket omfattande (datamängden) har urval av antalet observationerna främst gjorts utifrån att uppfylla syftet med examensarbetet nämligen undersöka *om* det finns *någon* skillnad mellan gjorda simuleringar och verkliga data. Arbetet har *inte* syftat till att beskriva *exakta* skillnader. Därefter har antalet observationer bestämts utefter tillgång (vissa retardations- och accelerationsintervall) och hanterbarhet (mängden).

Retardationen är den ur säkerhetssynpunkt viktigaste fordonsegenskapen. Stora variationer mellan olika inbromsningar och fordon, gör det viktigt att undersöka retardationerna ingående. Accelerationer genomförs på mycket olika vis beroende på vilka fordon som accelereras samt vilken förare som framför fordonen. Till exempel accelererar X31 mycket snarligt varje gång genom att föraren endast ställer in en börhastighet och fordonet sköter den faktiska accelerationen (se *kap 2.4.4 Teknisk data fordon X31 - Öresundståg*). Detta medför att ett representativt urval av accelerationer från fordonsloggarna är tillräckligt. För Rc-lokdragna tåg är däremot accelerationerna mer påverkbara av föraren (se *kap 2.4.5 Teknisk data fordon Rc-lok och vagnar*) och tågsammansättningen spelar stor roll för accelerationsbeteendet (se *kap 2.3.3 Förarbeteende resandetåg – godståg*).



Tillsättnings- och lossningstidens betydelse för en retardation är beroende av vilket fordon det gäller. För X31 (med en el-pneumatisk broms) är den isolerade tillsättnings tiden inte så intressant då den är lika snabb längs hela tåget och inte varierar nämnvärt mellan olika X31:or. Av denna anledning har vi valt att räkna in tillsättnings tiden i medelretardationen. Tillsättnings- och lossningstiden för Rc-lokdragna tåg (med pneumatisk broms) ses som funktion av tåglängden (se *kap 2.4.2 Bromssystem*). Detta medför att för varje (ur fordonsloggar) uttagen retardationskurva behöver tillsättnings- och lossningstiden bestämmas. Då dessa är svåra att utläsa blir resultatet osäkert och speciellt för lossningstid.

Observationer från fordonsloggar har grupperats efter X31 och Rc-lokdragna tåg. I båda grupperna har sedan accelerationer och retardationer vidare grupperats i olika intervall. Valet av retardationsintervall har gjorts dels utifrån full sth (180 *km/h*) och sedan delats upp i fyra (relativt jämna) intervall för att täcka hela intervallet 180-0 *km/h* och dels för att datamängdens omfattning skulle bli hanterbar.

Ur fordonsloggarna har två olika typer av grafer tagits fram. Accelerations- och retardationsgrafer där hastigheten (*m/s*) beskrivs som en funktion av tiden (*s*) samt inbromsningsgrafer (även kallade hastighetsdiagram) där hastigheten (*km/h*) beskrivs som funktion retardationssträckan (*m*). Den första graftypen möjliggör en uppskattning av accelerationers eller retardationers genomsnittliga storlek. Detta görs genom att bestämma lutningen på grafen. Den andra graftypen ger en bild av hur olika förare genomför accelerationer och retardationer. Det är framförallt bromssträckan och utseendet på grafen som en kan ge ungefärlig information om förarbeteendet.

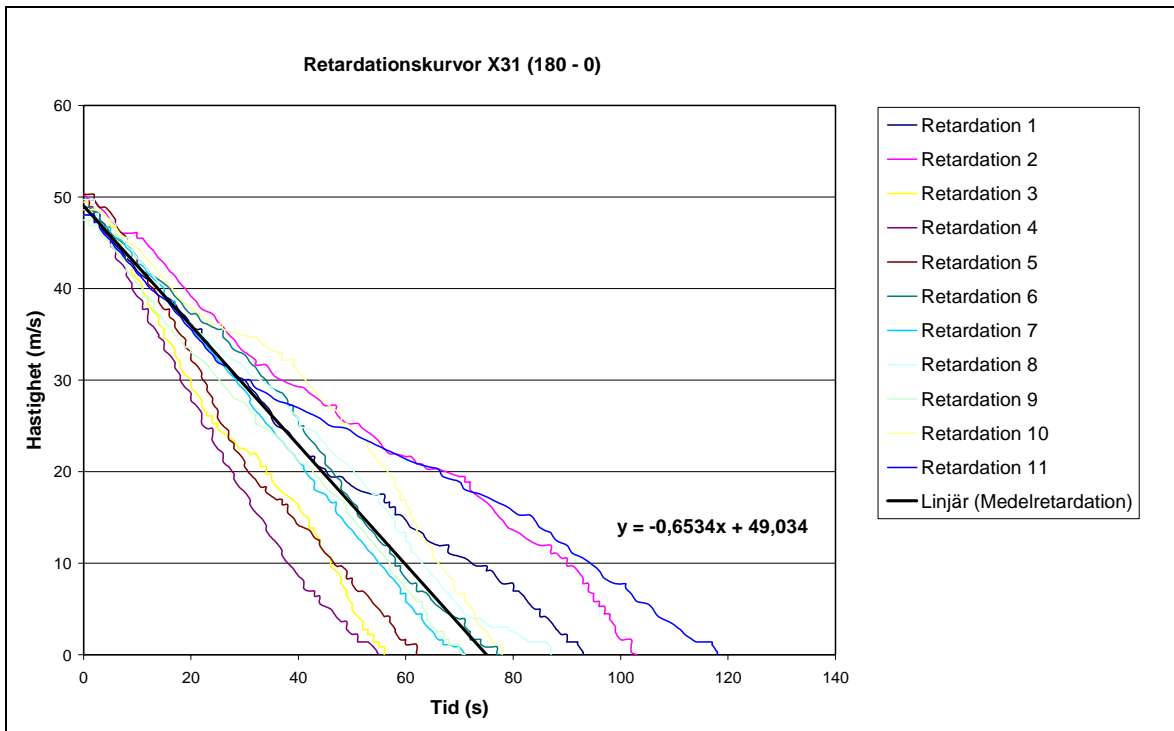
Retardationerna för X31 har ägnats stor del av loggarbetet där retardationsintervallen 180-0, 140-0, 80-0, 40-0 har studerats. I varje retardationsintervall har en genomsnittlig retardation, bromstid och bromssträcka tagits fram. Vidare har i retardationsintervallet 40-0 en jämförelse mellan retardation med ATC-övervakning och utan ATC-övervakning gjorts. När det gäller accelerationerna har accelerationsintervallet 0-180 studerats. För Rc-lokdragna tåg har retardations- och accelerationsintervall utgått ifrån tillgängliga i fordonsloggarna.

### 4.3 Sammanställning av fordonsgloggar

En presentation av de behandlade fordonsgloggarna och därutav dragna slutsatser ges i kapitlet.

#### 4.3.1 Retardation X31

Retardationskurvorna visar på variationer inom respektive retardationsintervall samt mellan olika retardationsintervall.



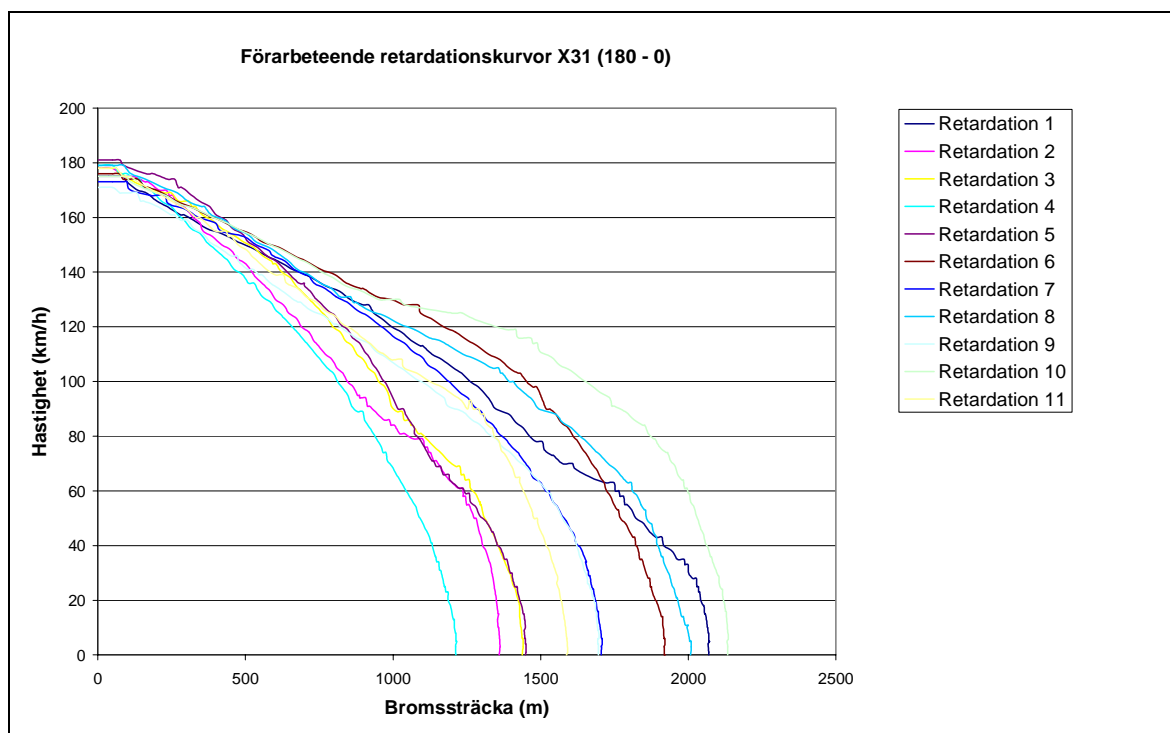
Figur 4.3-1 Retardationskurvor X31, retardationsintervall 180-0 km/h

I retardationsintervallet 180-0 varierar retardationstiden mycket (60-120 sekunder) och har en genomsnittlig tid strax under 80 sekunder.

Ur figur 4.3-1 framgår två typer av grafer. Den ena typen är i det närmaste linjär medan den andra är något avvikande (jämför retardation 8 och 11).

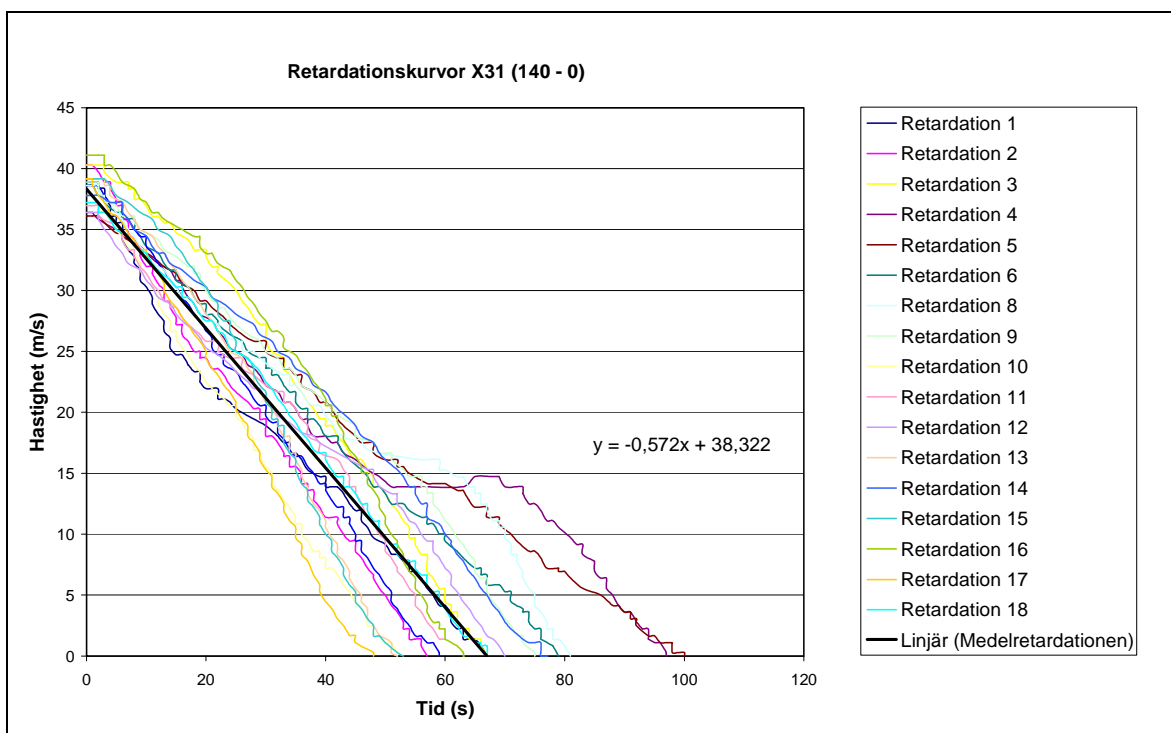
Tänkbar förklaring är olika initiala bromslägen i första fallet (samma genom hela retardationen). I den andra typen varierar bromslägena under retardationen. Spridningen mellan retardationerna börjar efter ca 20 sekunder och är relativt lika fram till dess. Likhetera kan beskrivas med att fordonens bromsverkan är lika stor vid hastighet mellan 40 och 50 m/s.

Här framgår att medelretardationen är  $0,65 \text{ m/s}^2$ .



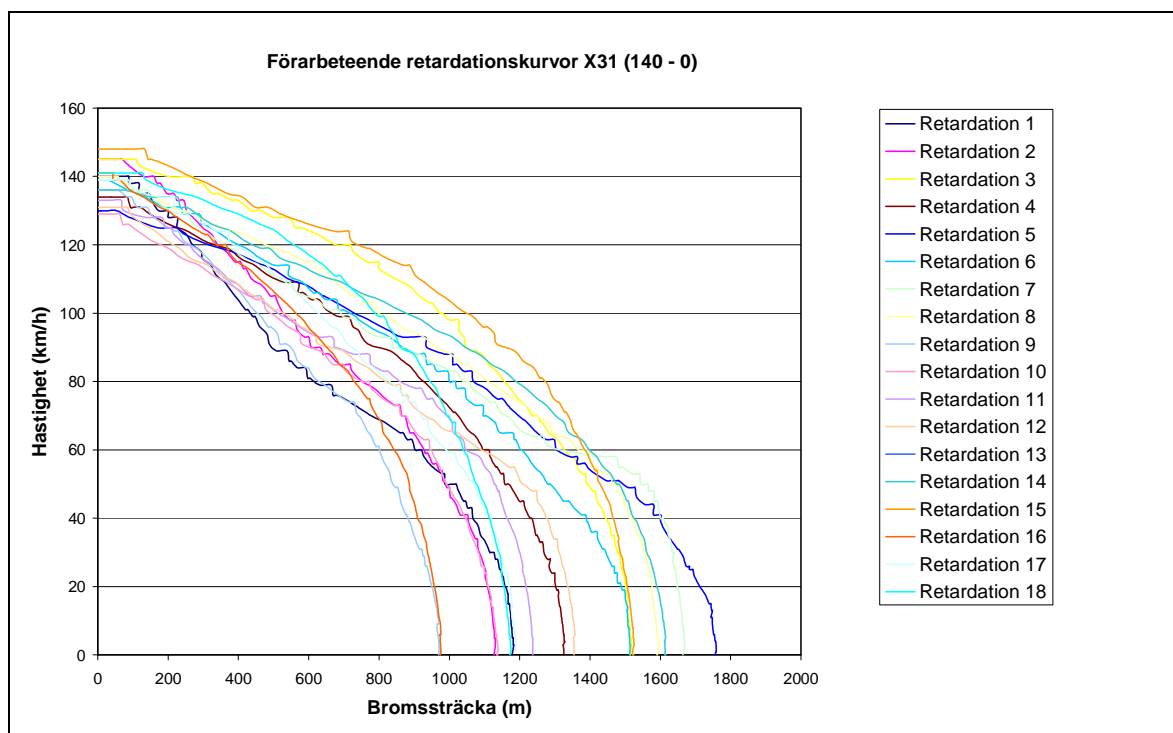
Figur 4.3-2 Förarbeteende X31, retardationsintervall 180-0 km/h

Ur figur 4.3-2 framgår det att samtliga retardationer ser ungefär likadana ut under de första 700 meterna varefter variationerna mellan bromssträckorna börjar. Bromssträckorna varierar mellan 1200 och 2100 meter. Procentuellt är differensen 43 %. Retardationernas likhet under den första delen kan förklaras med att förarna har likvärdig broms initialt ner till 140 km/h och sedan tar olika förarbeteende över den kvarvarande retardationen ner till noll. Trolig orsak till bromssträckornas spridning (1200-2100 meter) är den höga hastigheten vilken också medför problem för förarna vid avståndsbedömning och fri sikt längs banan.



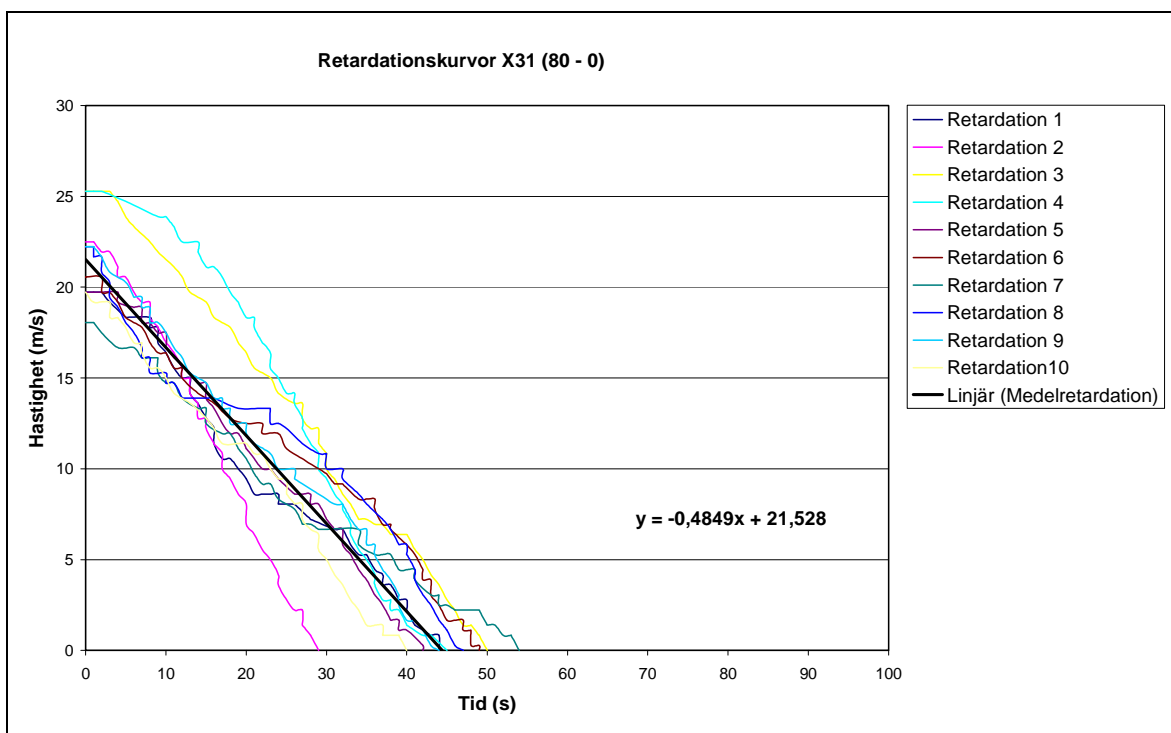
**Figur 4.3-3** Retardationer X31, retardationsintervall 140-0 km/h

I figur 4.3-3 framgår det att i retardationsintervallet 140-0 varierar utgångshastigheterna mellan 37 och 42 m/s (ca 130 - 150 km/h) och retardationstiden mellan 50 och 100 sekunder. Det är framför allt retardationerna 4, 5 respektive 8 som avviker från mängden genom att dessa efter ca 50 sekunder minskar i retardation under ca 15-20 sekunder för att sedan öka retardationen igen ner till noll. Övriga retardationer har mycket likartade utseende. Medelretardationen är  $0,57 \text{ m/s}^2$ .



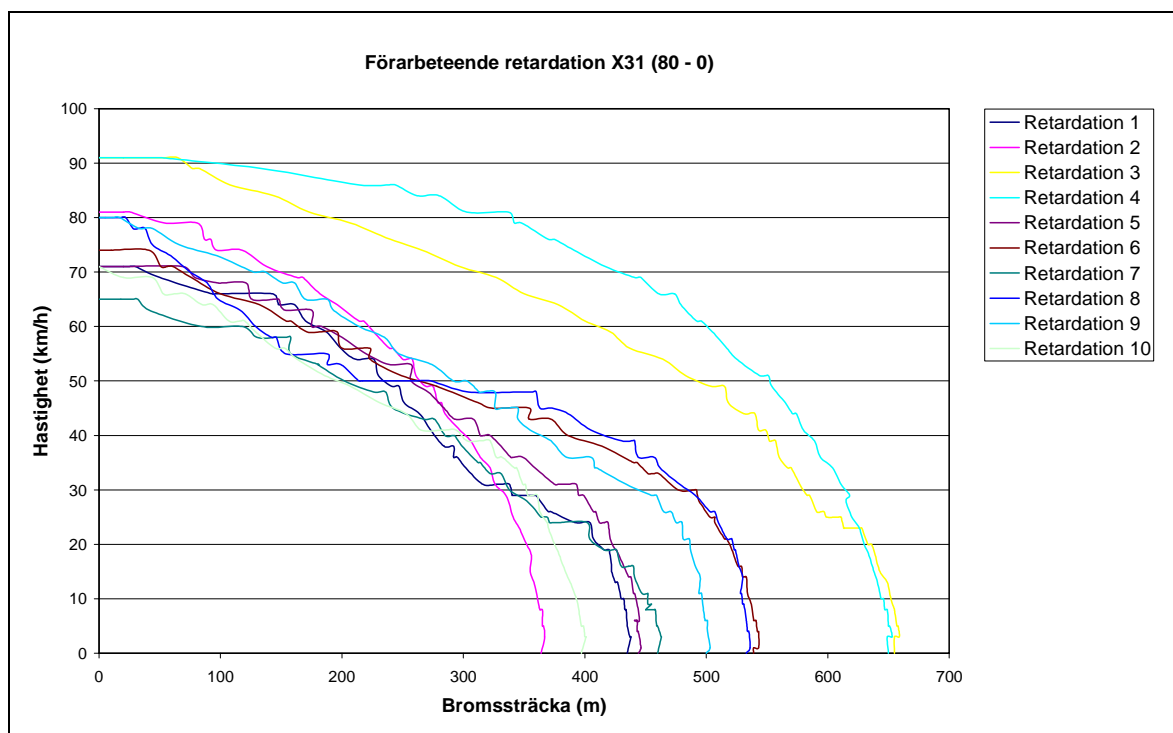
*Figur 4.3-4 Förarbeteende X31, retardationsintervall 140-0*

Graferna i *figur 4.3-4* uppvisar stora likheter i utformningen och jämnhet. Retardationskurva 7 avviker vid ca 1300 meter där föraren släpper upp bromsen för att senare öka retardationen igen. Bromssträckorna varierar mellan 1000-1800 meter. Bromssträckans procentuella differens är ca 45 % . En jämn retardation med samma bromsläge verkar vara en normalretardation från 140-0 km/h.



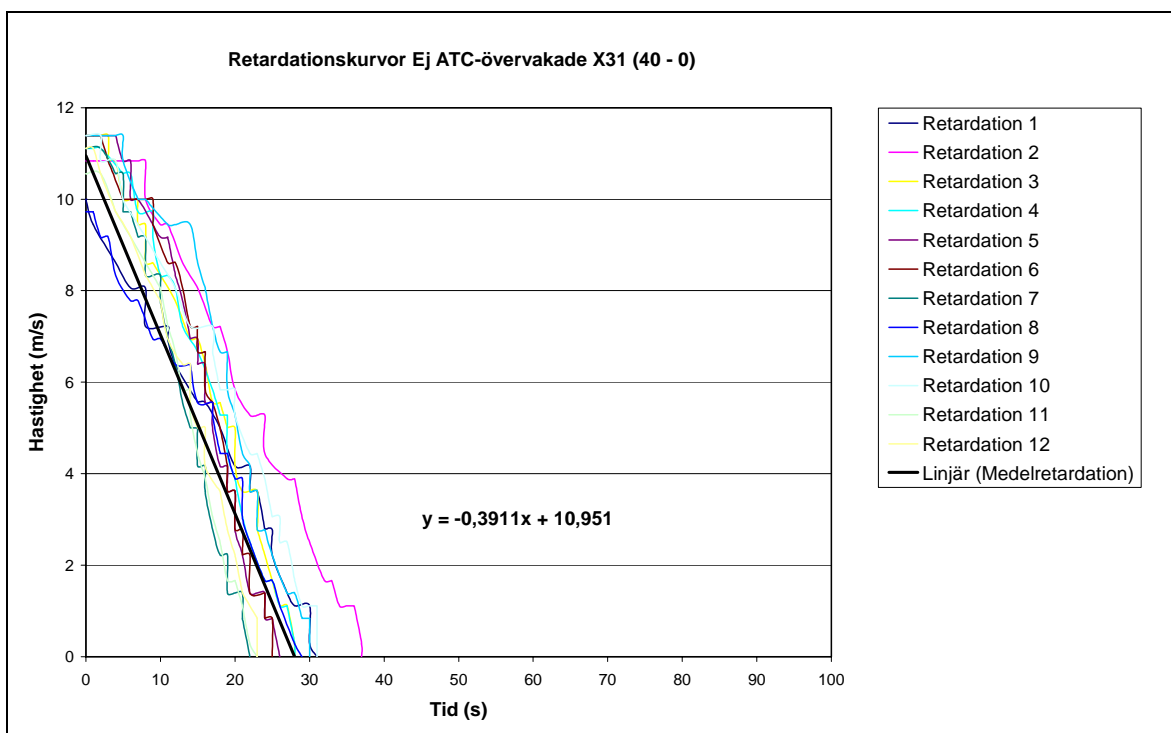
**Figur 4.3-5** Retardationer X31, retardationsintervall 80-0

I figur 4.3-5 framgår att i retardationsintervallet 80-0 varierar utgångshastigheterna mellan 18 och 25  $m/s$  (65 - 90  $km/h$ ) och retardationstiden mellan 30 och 55 sekunder. Den stora spridningen i utgångshastigheter medför viss spridningsökning av retardationstiden. Variationerna mellan olika retardationer är ganska stora. Medelretardation på  $0,49 m/s^2$  ger en ungefärlig uppskattning av en normalretardation från 80-0  $km/h$ .



Figur 4.3-6 Förarbeteende X31, retardationsintervall 80-0

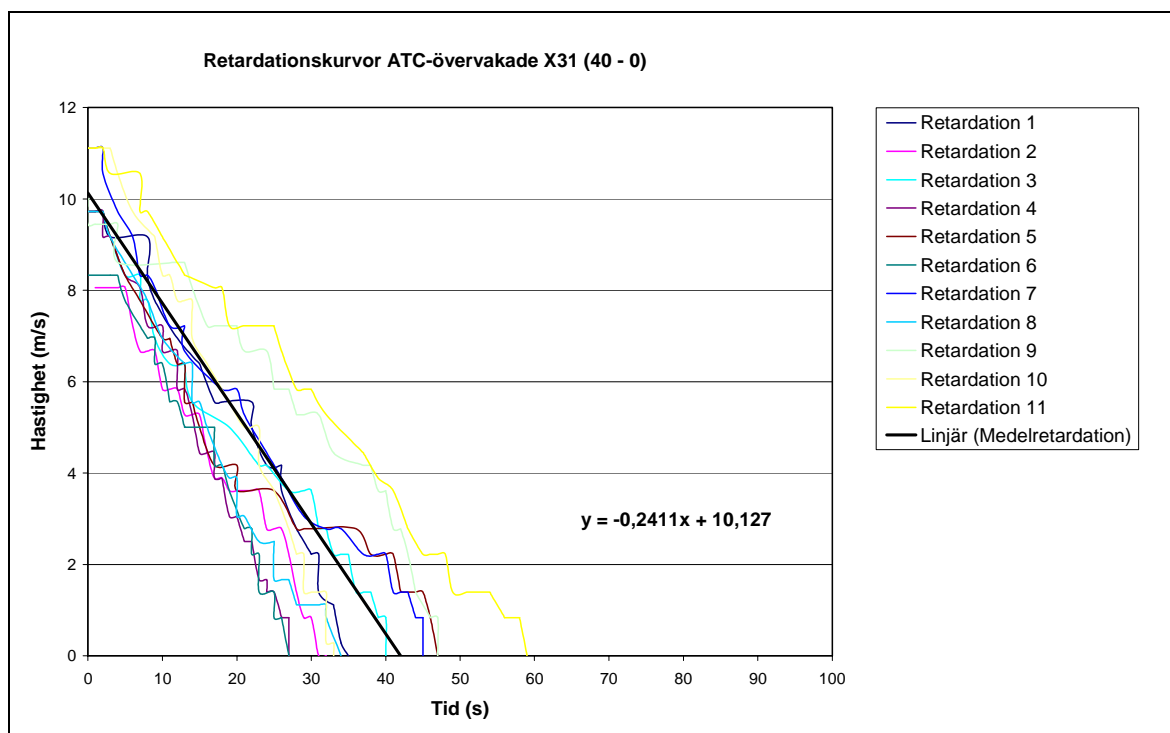
I figur 4.3-6 framgår det att bromssträckornas spridning ligger mellan 350 och 650 meter. Retardationerna har varierande bromslägen under bromssträckorna. En trolig förklaring kan vara att förarna tenderar att köra mer på sikt med minskad hastighet. Bromssträckornas procentuella differens är ungefär 46 % .



**Figur 4.3-7** Retardationer X31, retardationsintervall 40-0 ej ATC-övervakade

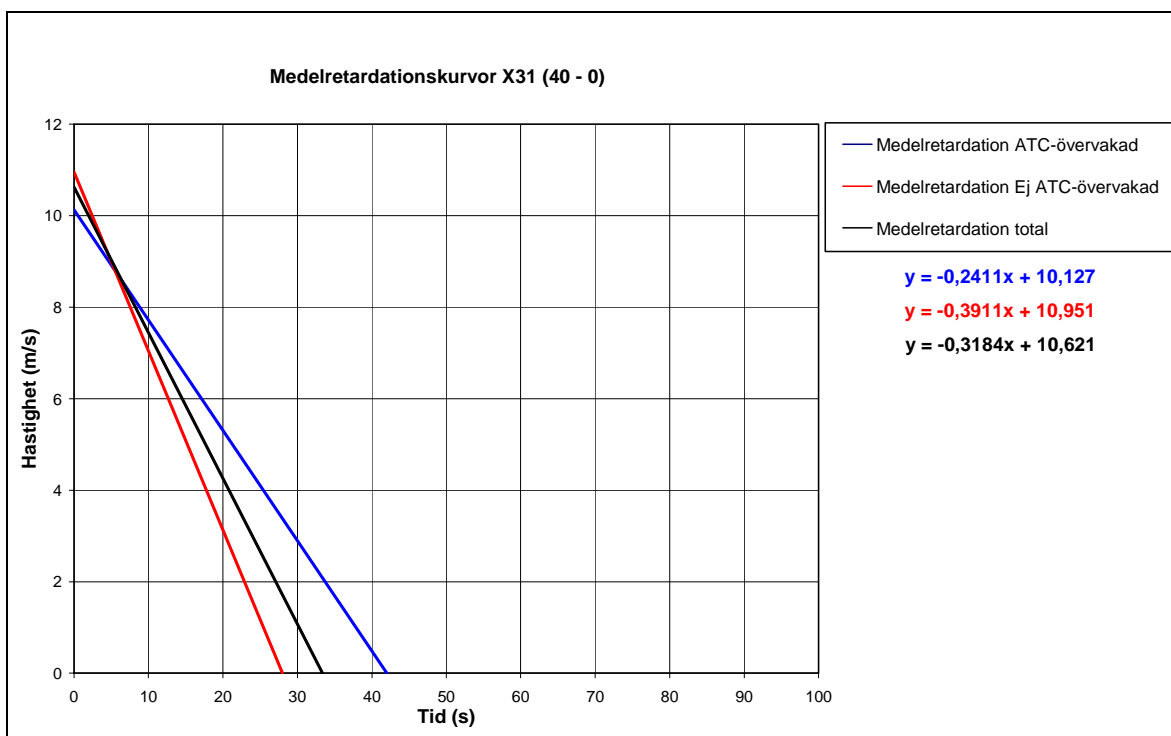
Retardationerna i *figur 4.3-7* är inte ATC-övervakade. Utgångshastigheterna varierar mellan 10 och 11  $m/s$  (36 - 40  $km/h$ ). Retardationstiden ligger mellan 22 och 38 sekunder. Det framgår tydligt att retardationerna har en linjär form och är mycket lika till utseende. Medelretardationen vid en inbromsning (40 - 0  $km/h$ ) som inte är ATC-övervakad, är 0,39  $m/s^2$ .





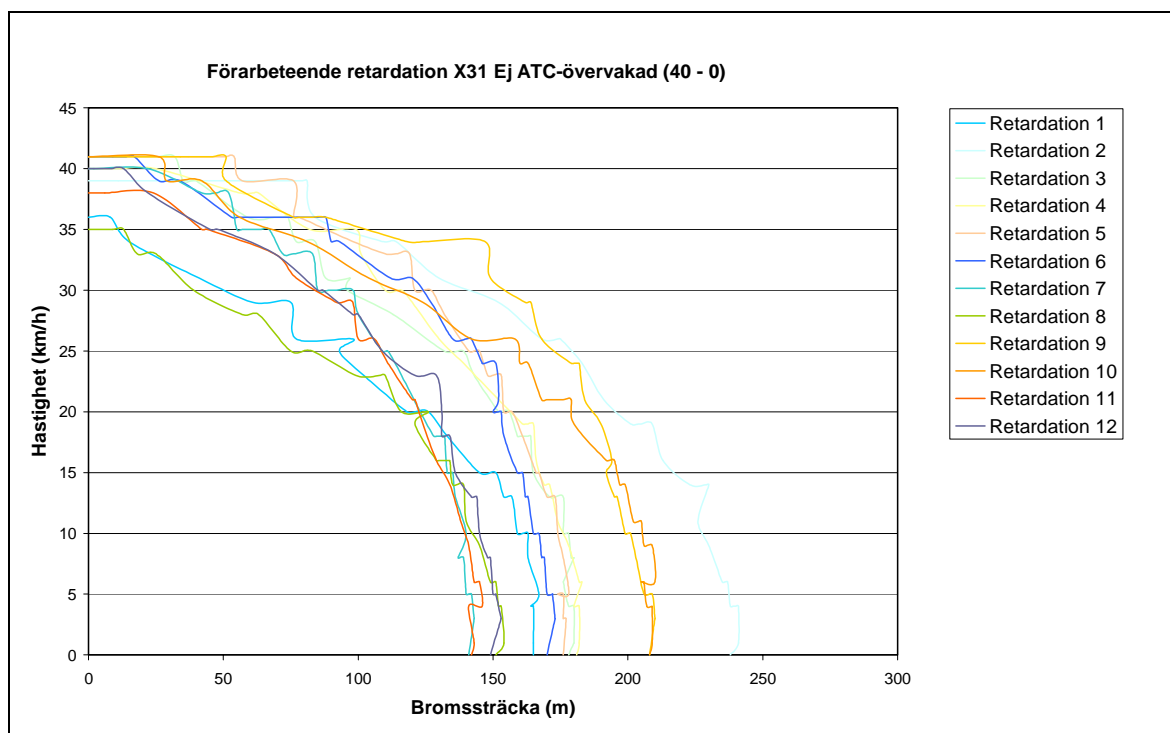
**Figur 4.3-8** Retardationer X31, retardationsintervall 40-0 ATC-övervakade

Retardationerna i figur 4.3-8 är alla ATC-övervakade. Utgångshastigheterna varierar mellan 8 och 11  $m/s$  (29 - 40  $km/h$ ). Retardationstiden ligger mellan 25 och 60 sekunder. Retardationerna förefaller vara icke-konstanta. En trolig förklaring är förarnas försiktighet mot ett ATC-ingripande under retardationerna. Medelretardationen vid en inbromsning (40 - 0  $km/h$ ) med ATC-övervakning är 0,24  $m/s^2$ .



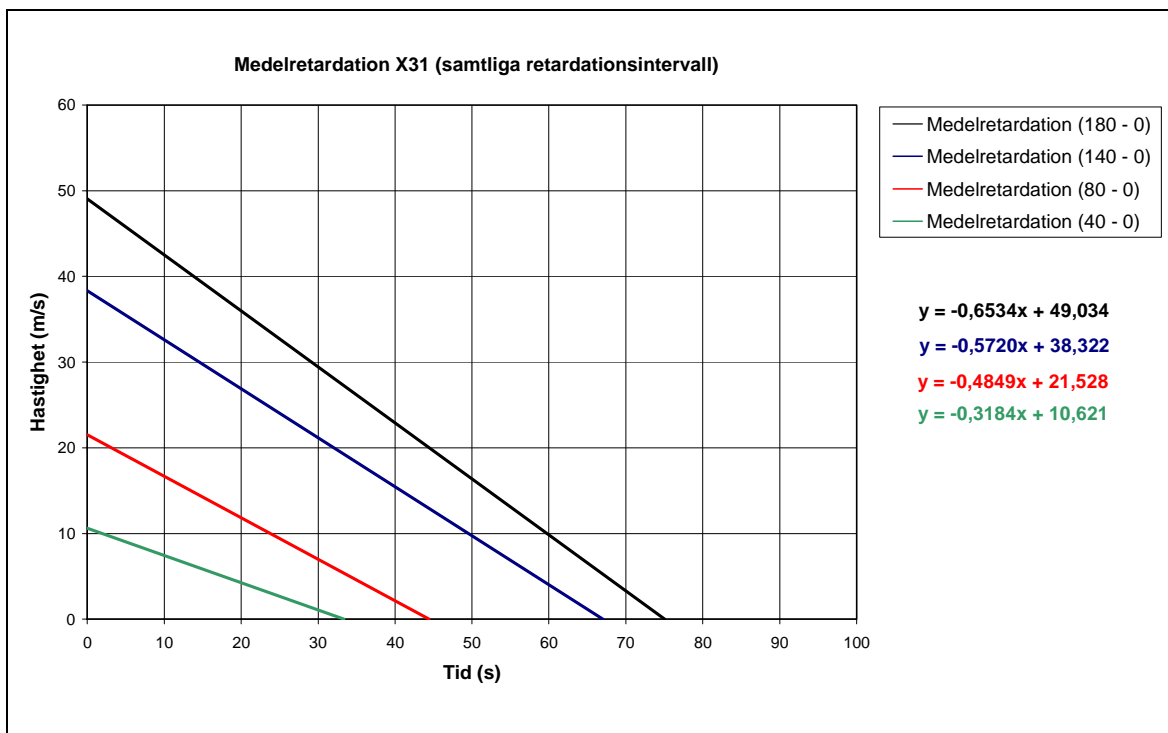
**Figur 4.3-9** Medelretardationer X31, retardationsintervall 40-0

Ett intressant faktum är att titta på hur medelretardationerna varierar mellan retardationer som är ATC-övervakade respektive ej ATC-övervakade. Enligt *figur 4.3-9* framgår det att medelretardationen (oberoende av ATC-övervakande eller ej) bör ligga kring  $0.31 \text{ m/s}^2$ . Retardationstiden skiljer sig åt mer än 10 sekunder mellan ATC-övervakade och ej ATC-övervakande retardationer.



Figur 4.3-10 Medelretardationer X31, retardationsintervall 40-0

Ur figur 4.3-10 framgår det att förarbeteende varierar mellan 140 och 240 meter. Bromsträckornas procentuella differens är ungefär 41 % . Ojämnheterna i ovanstående grafer förklaras med att varje tidpunkt vid retardationerna har ritats ut.

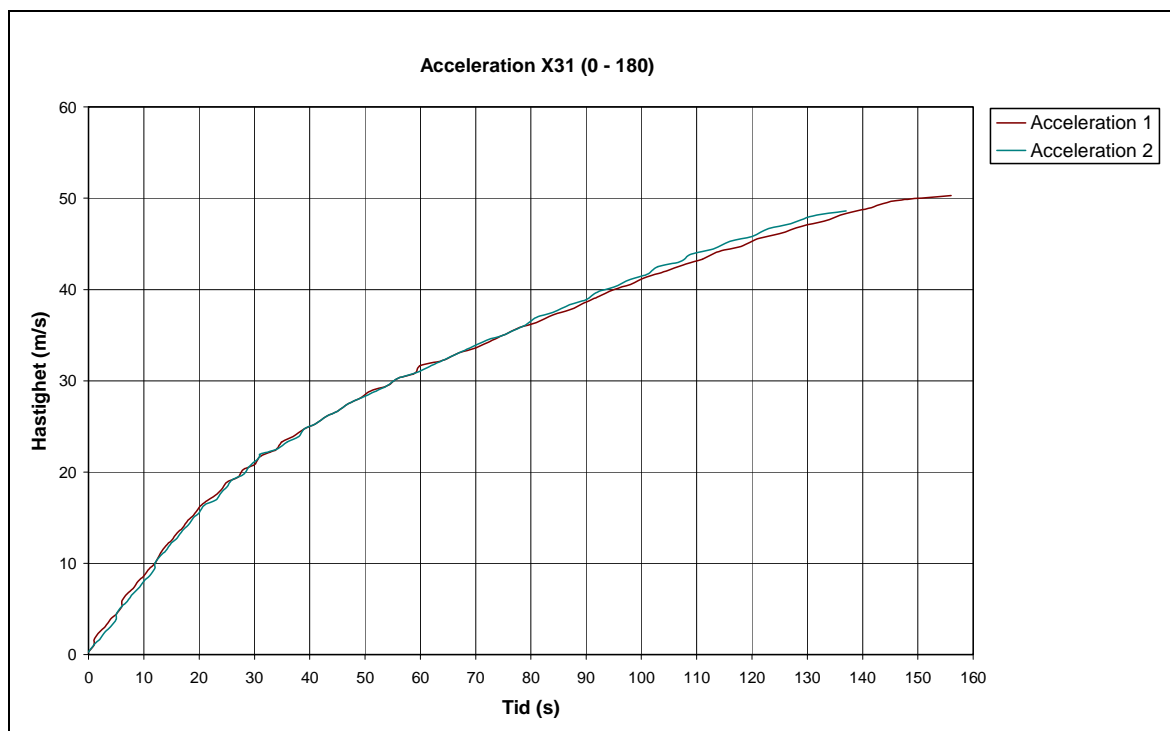


Figur 4.3-11 Medelretardation X31, samtliga retardationsintervall

Medelretardationerna varierar beroende på vilken utgångshastighet retardationen har haft. Som framgår av figur 4.3-11 är skillnaden mellan utgångshastigheterna 180 km/h och 40 km/h störst.

Sammanfattningsvis visar en jämförelse mellan retardationsintervallen att variationerna mellan retardationslängderna minskar med avtagande utgångshastighet. Troligtvis beror det på att förarnas retardationer sker mer på sikt, känsla och erfarenhet vid lägre utgångshastigheter.

### 4.3.2 Acceleration X31

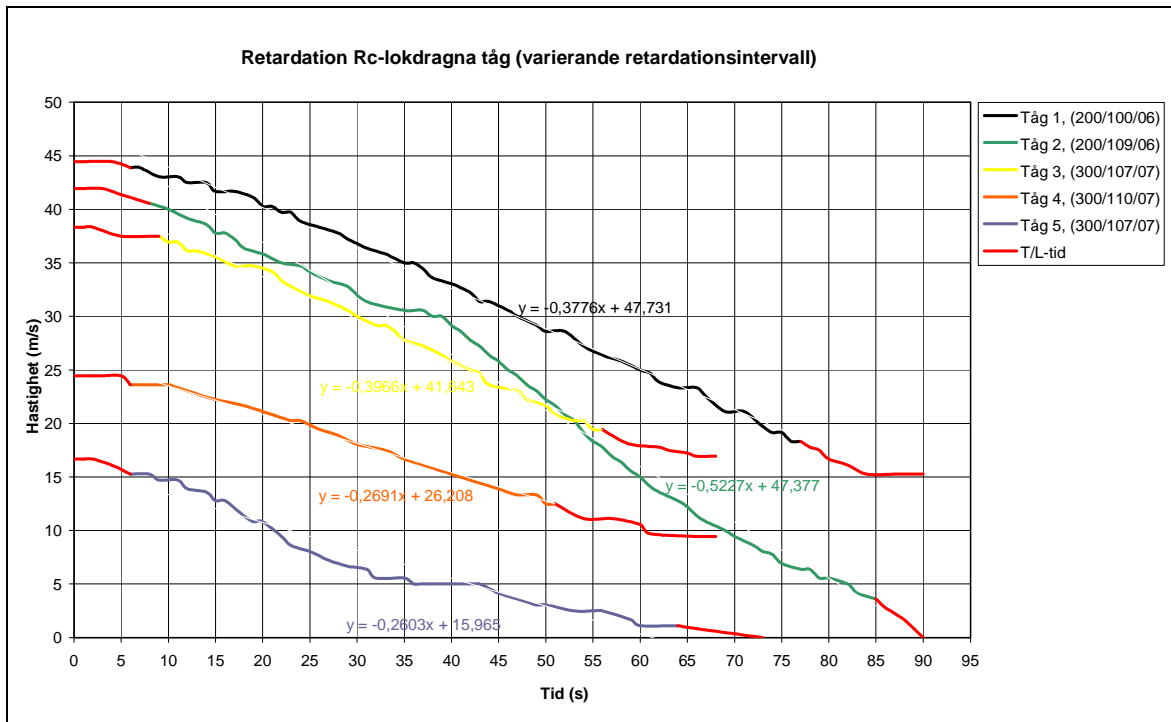


**Figur 4.3-12** Acceleration X31, accelerationsintervall 0-180

De två accelerationerna i *figur 4.3-12* är mycket lika till form och utseende. Trolig orsak är X31:ans accelerationsegenskaper där föraren endast ställer in en börshastighet (se *kap 2.4.4 Teknisk data fordon X31 - Öresundståg*). Accelerationerna kan delas upp i fyra delar med olika lutningar och därmed olika acceleration. Accelerationen är störst i början och avtar med ökad hastighet.

### 4.3.3 Retardation Rc-lokdragna tåg

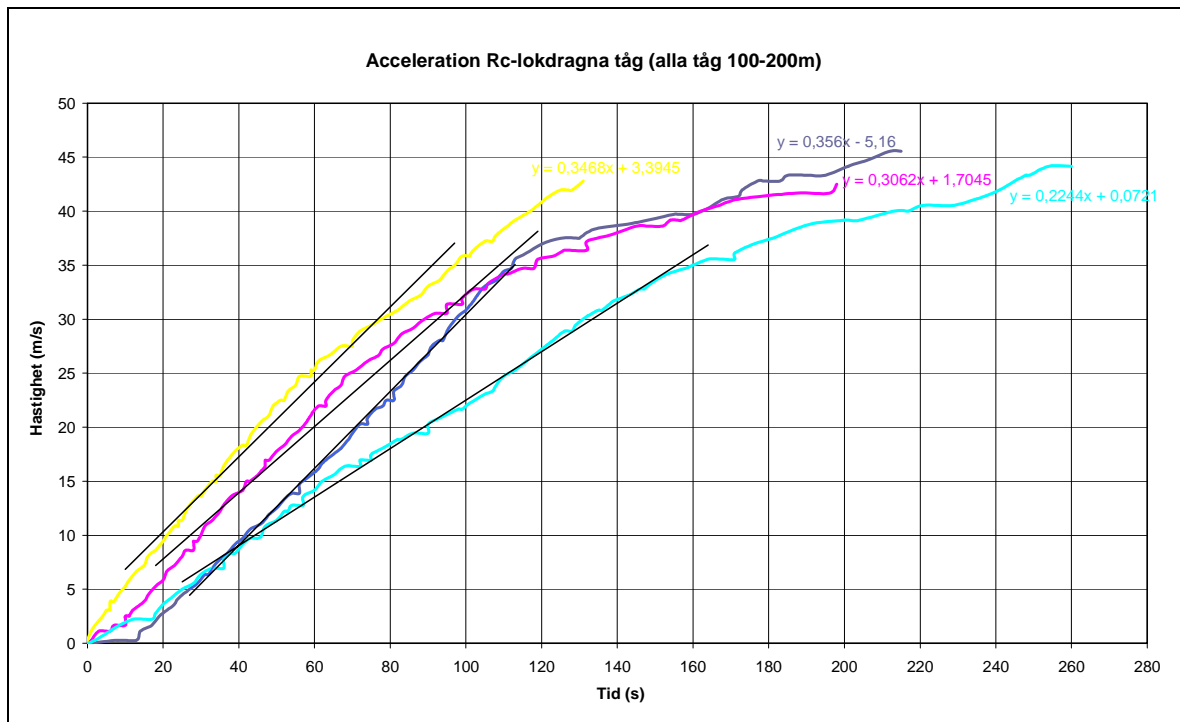
Sammansättningen av de Rc-lokdragna tågen varierar vilket medför variationer i bromsförmåga, längd, tillsättnings- och lossningstid. I *figur 4.3-13* benämns den för fordonen inmatade bromsförmågan för bromsprocent. De för fordonen inmatade ATC-data är angivna i *figur 4.3-13*.



**Figur 4.3-13** Retardationer Rc-lokdragna tåg, ett urval av retardationsintervaller

Urvalet av retardationer av Rc-lokdragna tåg har utgångshastigheter som varierar mellan 17-44  $m/s$  (60-160  $km/h$ ). Tillsättnings- och lossningstiden varierar mellan 6 och 8 sekunder respektive 10 och 15 sekunder. Detta kan jämföras mot de teoretiska tillsättnings- och lossningstiderna för olika bromslägen i *tabell 2.4-1 Jämförelse bromslägen*. Retardationen varierar mellan 0,26 och 0,53  $m/s^2$ . Ur *figur 4.3-13* framgår det att en lägre utgångshastighet resulterar i en lägre retardation.

#### 4.3.4 Acceleration Rc-lokdragna tåg



**Figur 4.3-14** Acceleration Rc-lokdragna tåg, ett urval av accelerationsintervaller

Gemensamt för de i figur 4.3-14 inritade accelerationerna är att de avtar vid en hastighet mellan 30 och 40 m/s. Accelerationerna varierar. Variationerna beror troligtvis på skillnader i förarbeteendena av olika anledningar. De olika accelerationerna har varierande ”uppstyrningstid”.

#### 4.4 Slutsatser kapitel 4

Nedan sammanställs de slutsatser vi kunnat dra utifrån analys av datamaterialet i detta kapitel.

- Medelretardationerna tenderar att minska med minskad utgångshastighet.
- Det finns en tillsättnings- och lossningstid som beror på tröghet i bromssystemen och reaktionstider (se *kap 2.4.2 Bromssystem*).
- De olika retardationslängdernas spridning minskar med minskad utgångshastighet.
- Retardationsförloppet är jämnare vid lägre utgångshastigheter vilket kan förklaras med att förarna tenderar att köra mer på sikt, känsla och erfarenhet vid lägre hastigheter.
- Medelretardationerna vid samma hastighet varierar beroende på om de är ATC-övervakade eller inte.
- De ATC-övervakade retardationsförloppen är mer ojämna vilket kan bero på att förarna varierar bromsläget mer för att undvika ATC-ingripande.
- Accelerationerna för X31 är nästintill identiska och oberoende av förarbeteendet då fordonet själv reglerar dragkraften.
- Accelerationerna för Rc-lokdragna tåg varierar och är beroende av förarbeteendet då föraren själv reglerar dragkraften utifrån tågvikt och tillgänglig adhesion.



## 5 Jämförelse simulering – fordonslogg

Syftet med examensarbetet är att undersöka fordons- och förarbeteende vid framförande av tåg i verkligheten för jämförelse mot de modeller som för närvarande används i simuleringsprogrammet OpenTrack. Slutsatser av jämförelser mellan gjorda simuleringar och resultatet av loggarna ges nedan.

### 5.1 X31

De skillnader som upptäckts mellan fordonsloggarna och gjorda simuleringar för X31 delas in enligt underkapitel till kap 4.3 (retardation respektive acceleration).

#### 5.1.1 Retardation

I fordonsloggarna framgår det att olika utgångshastigheter medför olika medelretardationer (se *figur 4.3-11*).

Det i OpenTrack inställda retardationsvärdet motsvarar inte de värden som tagits fram ur fordonsloggarna vilket framgår i *tabell 5.1-1* nedan.

*Tabell 5.1-1 Jämförelse retardationstal*

Hastighet (km/h)	Retardation (m/s <sup>2</sup> )	
	OpenTrack	Fordonsloggar
180	0,83	0,65
140	0,83	0,57
80	0,83	0,48
40	0,83	0,31

Den stora skillnaden mellan resultatet från fordonsloggarna och gjorda simuleringar, är att retardationerna i OpenTrack är konstanta (oberoende av utgångshastighet).

I fordonsloggarna har en tillsättnings- och lossningstid kunnat utläsas på ungefär 2 sekunder vilket inte har funnits med i gjorda simuleringar.

Vid en retardation från 180-0 km/h skiljer sig bromstiden från simulering nästan 20 sekunder mot framtagen medelretardation. Denna tidsskillnad motsvarar en bromssträcka på ungefär 500 meter.

#### 5.1.2 Acceleration

Form och utseende på de ur fordonsloggarna uttagna accelerationskurvorna (0-180 km/h) stämmer väl överens med de framtagna från simuleringarna.

Skillnader återfinns främst i accelerationernas längd och tid. Fordonsloggarnas accelerationsförlopp är mellan 20 och 30 sekunder längre. Den troliga orsaken är att dragkraftsdiagrammet som används vid accelerationberäkningar i OpenTrack (se *kap 3.3 Sammanställning av grundsimuleringarna*) är för högt ställt. Förslag till maximal dragkraft ges i *kap 6.2 Resultat*.

## 5.2 Rc-lokdragna tåg

De skillnader som upptäckts mellan fordonsloggarna och gjorda simuleringar för Rc-lokdragna tåg delas in enligt underkapitel till kap 4.3 (retardation respektive acceleration).

### 5.2.1 Retardation

I fordonsloggarna framgår det att olika utgångshastigheter medför olika medelretardationer (se *figur 4.3-13*).

Det i OpenTrack inställda retardationsvärdet  $0,65 \text{ m/s}^2$  motsvarar inte fordonsloggarnas värden vilka varierar mellan  $0,26$  och  $0,52 \text{ m/s}^2$ .

I fordonsloggarna har tillsättnings- och lossningstid kunnat utläsas (se *kap 4.3.3 Retardation Rc-lokdragna tåg*). I grundinställningarna i OpenTrack har ingen hänsyn tagits till detta (se *kap 3.3 Sammanställning av grundsimuleringarna*).

### 5.2.2 Acceleration

Accelerationerna framtagna ur fordonsloggarna uppvisar stora skillnader avseende tid och längd (se *figur 4.4-14*). Trots detta kan ett accelerationsmönster (grafernas utseende och form) ses som stämmer väl överens med gjorda simuleringar.

Undantaget är att i fordonsloggarna kan en ”upp- och nedstyrningstid” av motorströmmen utläsas vilken inte finns med i simuleringarna.

## 6 Slutdiskussion och resultat

Genomförandet av examensarbetet har gjorts utefter syfte och problemställningar.

Syftet med examensarbetet har varit att undersöka fordons- och förarbeteende vid framförande av tåg i verkligheten för jämförelse mot de modeller som för närvarande används i simuleringsprogrammet OpenTrack.

Där problemformuleringen som examensarbetet utgår ifrån varit:

- Avbildar den simulerade tågtrafiken den verkliga avseende fordons- och förarbeteende?
- Finns det behov av nya eller ändrade parametrar i OpenTrack?
- Går det utifrån examensarbetet att definiera ett normalfordon och en normalförare (beroende på fordonstyp)?

Slutsatserna som kunnat dras ger som helhet svar på ovan ställda problemformuleringar.

### 6.1 Slutdiskussion

Upplägget av slutdiskussionen ser ut som följer. Först beskrivs och diskuteras slutsatserna för uppställd problemformulering och därefter diskuteras resultatens tillförlitlighet. Som en sista del i slutdiskussionen tar vi upp andra frågor som uppkommit under arbetets gång.

*Avbildar den simulerade tågtrafiken den verkliga avseende fordons- och förarbeteende?*

Slutsatserna i kapitel 5 har gett en tydlig bild av att det finns skillnader mellan simulering och verklighet. Skillnaderna gäller ett begränsat urval av fordonsegenskaper (accelerationer, retardationer, tillsättnings- och lossningstider). I skillnaderna mellan simulering och verklighet har förarbeteendet en underordnad roll då detta kan ses som ”inbakat” i resultatet av fordonsegenskaperna (se *kap 4.2 Behandlande av fordonsloggar*).

*Finns det behov av nya eller ändrade parametrar i OpenTrack?*

Utifrån jämförelserna i kapitel 5 har vi dragit slutsatsen att det finns behov av nya eller ändrade parametrar i OpenTrack vilka huvudsakligen berör retardationsegenskaper. De nya parametrar vi skulle vilja se i OpenTrack är:

- Möjlighet att ställa in retardationsförmåga beroende på utgångshastighet.
- Möjlighet att ange olika retardationsförmågor beroende på om retardationen är ATC-övervakad eller inte.

För befintliga parametrar i OpenTrack som vi skulle vilja se en justering av är:

- Tydligare möjlighet att ställa in tillsättnings- och lossningstid.

*Går det utifrån examensarbetet att definiera ett normalfordon och en normalförare (beroende på fordonstyp)?*

Vi har kommit fram till att vi kan motivera en definition av ett normalfordon där normalföraren är innefattad. Motiveringen till detta framgår dels av *kap 4.2 Behandlande av fordonsloggar* samt i fortsättningen av stycket.

De i examensarbetet framarbetade värdena för detta normalfordon ges under *kap 6.2 Resultat*. Det har under arbetets gång diskuterats om hur normalfordonet och normalföraren kan definieras utifrån datamaterialet i fordonsloggarna och inställningsmöjligheterna i OpenTrack.

Vi har valt att definiera det genom att betrakta fordonsbeteendet som en funktion av både fordonets och förarens beteende. Detta medför att fordonsbeteendet kommer att vara den mätbara egenskapen som även inkluderar effekterna av förarens beteende.

Motivering till denna definition är att förarbeteendet är svårt att mäta (utifrån fordonsloggar) och inställningsmöjligheterna för begränsning av fordonsprestanda inte ger en riktig bild av resultaten i arbetet. Detta för att en reducering av fordonsprestanda i OpenTrack påverkar hela tågframförandet oberoende om tågets retardations- och accelerationsegenskaper skiljer sig åt.

Det är viktigt att diskutera frågan kring resultatens tillförlitlighet (se även *kap 4.2 Behandlande av fordonsloggar*). Det är mycket svårt tala om någon form av noggrannhet i resultaten (värdena) då dessa bygger på fordonsloggar med viss begränsning i informationsinnehållet. En viktig detalj är att inga geografiska platser kan knytas till loggarna. Följden blir att framtagna retardationer, accelerationer samt tillsättnings- och lossningstider inte tar hänsyn till olika geometriska förhållanden (t.ex. lutningar och kurvor) längs banan. En följdfråga blir då om de ur fordonsloggarna uttagna observationerna (retardationer, accelerationer, tillsättnings- och lossningstid) verkligen ger en allmän, genomsnittlig och representativ bild av verkliga förhållanden? Det svar som kan motivera val av metod för genomförande av sammanställning och analys av fordonsloggarna, är en av examensarbetets problemställningar:

- Avbildar den simulerade tågtrafiken den verkliga avseende fordons- och förarbeteende?

Målet har varit att titta efter skillnader mellan simulering och verklighet och INTE att bestämma exakta förhållanden. De numeriska resultat som presenteras i examensarbetet har till uppgift att belysa skillnader mellan gjorda simuleringar och verklighet snarare än att vara exakta och statistiskt korrekta. Därför skall de numeriska resultaten främst ses som riktvärde för hur ett normalfordon (innefattande normalföraren) beter sig.

I slutskedet av examensarbetet har frågor kring hur datamaterialet hanterats dykt upp. Valet vi gjorde var att titta på varje tillgänglig tidsintervall (sekund) när sammanställningen av fordonsloggarna gjordes. Konsekvens av detta är att retardations- och accelerationskurvorna blir en aning missvisande genom att de framstår som ojämna. En eftertanke är att en utjämning av tidsintervallet skulle ha gjorts och på så vis tydliggöra olika retardations- och accelerationskurvorna.

Vidare skulle det också vara intressant att genomföra fältstudier med sträckspecifik data för att kunna ge eventuella förklaringar till varför olika retardationer i *kap 4.3 Sammanställningar av fordonsloggar* utmärker sig från mängden. Hade vi valt att bortse från vissa utmärkande retardationer hade ett tydigare resultat kunnat uppnås.

Slutligen när det gäller användningen av föreslagna värden i *kap 6.2 Resultat* så bör simuleringsprogrammet ställas in utefter målet med simuleringen. Detta för att skillnaden mellan normalframförandet av ett fordon skiljer sig markant från vad fordonet egentligen maximalt klarar av (främst retardation). Denna slutsats drar vi utifrån vetskapen att en normalretardation är mycket lägre än ett fordons maximalretardation. Är det så att det är normalförhållandet man vill simulera fram så är det värdena för normalfordon och normalförare man bör använda sig av. Är simuleringsresultatet av säkerhetsmässig karaktär så bör maximala värden användas, alltså vad fordon och förare maximalt klarar av.

## 6.2 Resultat

Detta examensarbete omfattar bara normalfordon och normalförare och i *tabell 7.2-1* sammanställs värdena för retardationsförmågan för fordonet X31. Vid val av retardationstal bör det närmast banans sth väljas då högre utgångshastighet har större inverkan på simuleringsresultatet då inställningsmöjlighet för varierande utgångshastigheter inte finns.

*Tabell 7.2-1 Retardationstal X31.*

Banans sth	Retardationstal
180	0,65
140	0,57
80	0,49
40	0,32

Accelerationsförmågan för X31 bör också sänkas för att motsvara verkligheten bättre. Den maximala dragkraften för fordonet bör ligga runt 280 *kN* vilket har framkommit vid prov av olika dragkrafter i OpenTrack. Trots begränsade data för Rc-lokdragna tåg visar analyserade loggar att även för detta fordon spelar utgångshastigheten roll för retardationen. Den retardationsförmåga som bör användas för normalfordonet och normalföraren för Rc-lokdragna tåg är ett tal i intervallet 0,26-0,53  $m/s^2$  (se *figur 4.3-13*) beroende på utgångshastigheten. Hänsyn till tillsättnings- och lossningstid bör också tas och då är grundtillsättningstiden 5 sekunder med tillägg på 1 sekund per hundra meter tåg. Lossningstiden är också beroende på tåglängden och bör vara längre än tillsättningstiden. För teoretiska tillsättnings- och lossningstider se *tabell 2.4-1 Jämförelse bromslägen*. Osäkerheten gällande lossningstider för loktåg är stor och vidare studier kring detta är av vikt.

### 6.3 Allmänna tankar kring godståg

Eftersom fordonsloggarna för Rc-lokdragna tåg endast omfattande resandetåg så gjordes en intervju av en erfaren förare för att en uppfattning om skillnaden mellan framförandet av resandetåg respektive godståg. De egenskaper som kunnat utläsas ur loggarna för Rc-lokdragna resandetåg är även applicerbara på godståg men med större effekter. Anledningen till detta är de större tågvikter och tåglängder som godstågen har och de då ökade krafterna. Exempelvis så är godståg oftast längre än resandetåg och då ökar tillsättnings- och lossningstiderna (se *tabell 2.4-1 Jämförelse bromslägen*). Även bromsprocenten ökar med ökad tågvtikt. Den tidigare nämnda ”upp- och nedstyrningstiden” för motorströmmen är av ännu större betydelse då risken för att slita sönder tåget är mycket större. Vid framförandet av godståg kan sth variera då förarna verkar planera körningen utifrån banans lutningar och då för att undvika onödiga bromsningar.

### 6.4 Vidare studier

De förslag på vidare studier som kan ges med utgångspunkt från examensarbetet är:

- En studie som fokuserar på fordons- och förarbeteende gällande godståg (inklusive tillsättnings- och lossningstider).
- En funktionsinventering av OpenTrack med förslag och vidareutveckling av nya fordons- och förarparametrar.
- En studie där geografiska platser kan knytas till fordons- och förarbeteende och på så vis belysa frågor kring gångmotstånd och bangeometrins inverkan på simuleringar i OpenTrack.

## 7 Referenser

- Andersson E, Berg M Del 1, 2007 – ”Spårtrafiksystem och fordon. Del 1 Spårtrafiksystem” Järnvägsgruppen KTH Stockholm.
- Andersson E, Berg M, Del 2, 2007 – ”Spårtrafiksystem och fordon. Del 2 Spårtrafiksystem” Järnvägsgruppen KTH Stockholm.
- Bergstedt R, 2005 – ”Effektiva tågssystem för godstrafik - Bromssystem” Arbetsrapport KTH Stockholm. Hämtad 2009-02-05, [http://www.infra.kth.se/jvg/Rapporter/0508\\_inlaga.pdf](http://www.infra.kth.se/jvg/Rapporter/0508_inlaga.pdf).
- Bombardier Transportation Sweden AB, 2003 – ”Tågmanual OTU, Oeresundstoget” Driftinstruktion utgiven 2003-05-07
- Hellström P, 2009 – ”Open Track-Utbildning” Genomförd 2009-02-17 till 2009-02-18 i Vecturas regi. Plats: Vecturas kontor i Malmö.
- JvSFS 2008:7 B1 – ”Järnvägsstyrelsens trafikföreskrifter. Bilaga 1 Termer.” Hämtad: 2009-03-23, <http://www.transportstyrelsen.se/sv/Regler/Regler-for-jarnvag/Jarnvagsstyrelsens-forfattningssamling/JTF-bilagor/>
- JvSFS 2008:7 B11 – ”Järnvägsstyrelsens trafikföreskrifter. Bilaga 11 Broms.” Hämtad: 2009-03-23, <http://www.transportstyrelsen.se/sv/Regler/Regler-for-jarnvag/Jarnvagsstyrelsens-forfattningssamling/JTF-bilagor/>
- Kecklund L, 2001 – ”Slutrapport från TRAIN-projektet. Trafiksäkerhet och informationsmiljö för lokförare. Risker samt förslag till säkerhetshöjande åtgärder.” Banverket. Hämtad 2009-03-10, <https://www.it.uu.se/research/project/train/papers/TRAIN-slutrapport.pdf>.
- KTH Järnvägsggruppen, 2008 – ”Järnvägsordlista – ett urval förkortningar och begrepp inom järnvägstrafik.” KTH Stockholm. Hämtad 2009-05-18, <http://www.infra.kth.se/jvg/jarnvagiana/jarnvagsordlista.pdf>
- Lukaszewicz P, 2001 – ”Energy consumption and running time for trains.” Doktorsavhandling KTH Stockholm. Hämtad 2009-02-14, [http://www.diva-portal.org/diva/getDocument?urn\\_nbn\\_se\\_kth\\_diva-3185-2\\_fulltext.pdf](http://www.diva-portal.org/diva/getDocument?urn_nbn_se_kth_diva-3185-2_fulltext.pdf).
- Nilsson H, 2009. Lokförare SJ AB. Telefonintervju 2009-05-01



Open Track, 2009 [www.opentrack.uc](http://www.opentrack.uc)

Open Track Info, 2009 – “*OPEN TRACK Simulation of Railway Network.*”

Hämtad 2009-02-18,

<http://www.opentrack.ch/opentrack/downloads/opentrackInfoE.pdf>

SJ Kompetensutveckling, 1999 – “*Bromslära för lokförare.*” Elevhäfte till lokförare. Svensk Tågkompetens AB

Sjöborg C, 2000 – “*Fordonsbeskrivning Lok Litt Rc.*” Svensk Tågkompetens AB

## Bilaga 1 Ekvivalent massa

Den Ekvivalenta massan kan beräknas ur ekvationen för rörelseenergi (kinetisk energi)  $E_{Kin}$ . Den kinetiska energin beräknas som summan av färdhastighetens och de roterande massornas rörelseenergi.

$$E_{Kin} = \frac{mv^2}{2} + \frac{J\Omega^2}{2} \quad [\text{Nm}] \quad (1)$$

med

$$\begin{aligned} m &= \text{massa} && [\text{kg}] \\ v &= \text{massans rörelsehastighet} && [\text{m/s}] \\ \Omega &= \text{massans rotationshastighet} && [\text{rad/s}] \\ J &= \text{massans tröghetsmoment} \end{aligned}$$

*Massans tröghetsmoment* beräknas ur följande samband:

$$J = \int r_m^2 dm \quad [\text{kgm}^2] \quad (2)$$

där  $r_m$  = radie för masselement  $dm$ , och är ett mått på det motstånd som finns för att t.ex. accelerera ett hjul runt sin egen axel.

Genom att nu betrakta en ren rullning kan *massans rotationshastighet* ( $\Omega$ ) beskrivas genom

$$\Omega = \frac{v}{r} u \quad [\text{rad/s}] \quad (3)$$

med

$$\begin{aligned} v &= \text{massans rörelsehastighet} \\ r &= \text{hjulets radie} \\ u &= \text{utväxlingsförhållande mellan hjul och roterande massa} \end{aligned}$$

Genom att kombinera (1) och (3) kan rörelseenergin beskrivas enligt:

$$E_{Kin} = \frac{mv^2}{2} + \frac{J\Omega^2}{2} = \frac{mv^2}{2} + \frac{Jv^2}{2r^2} u^2 = \left( m + \frac{Ju^2}{r^2} \right) \frac{v^2}{2} = m_e \frac{v^2}{2} \quad (4)$$

Den sista likheten ger oss nu ett uttryck för den ekvivalenta massan enligt

$$m_e = m + \frac{Ju^2}{r^2} = m(1 + \chi) \quad [\text{kg}] \quad (5)$$

Ovanstående resonemang resulterar i att den ekvivalenta massan för ett givet fordon kan beskrivas som dess massa gånger en fordonsrelaterad konstant. Här införs benämningarna relativt masstillskott ( $\chi$ ), ekvivalent masstillskott ( $m\chi = \frac{Ju^2}{r^2}$ ) och ekvivalent masströghetsmoment ( $J_e = Ju^2$ ). Det relativa masstillskottet kan sägas bestå av den massökning som ett fordon i rörelse får på grund av roterande massor (Andersson & Berg 2007).

## Bilaga 2 Utdrag fordonslogg

Utdraget är en ATC-övervakad retardation från 180-0 (km/h) för X31.

Sträcka (m)	Tid HH:MM:SS	Hastighet Spd	Bromstryck Bpr	Förindikator Aux	Huvudindikator Main
35862	20:47:41	180		5 7Px	180
35912	20:47:42	180		40 7Px	180
35937	20:47:43	178		65 7Px	180
35949	20:47:43	178		90 7Px	180
35961	20:47:43	178		90 7Px	180
35961	20:47:43	178		140 7Px	180
35986	20:47:44	178		140 7Px	180
35986	20:47:44	175		160 7Px	180
36042	20:47:45	174		160 7Px	180
36066	20:47:45	174		160 7Px	180
36078	20:47:46	174		160 7Px	180
36090	20:47:46	171		160 7Px	180
36137	20:47:47	169		160 7Px	180
36196	20:47:48	169		160 7Px	180
36196	20:47:48	169		160 7A	180
36196	20:47:48	166		160 7A	180
36219	20:47:49	166		160 7A	180
36219	20:47:49	166		160 7A	180
36254	20:47:49	164		160 7A	180
36311	20:47:51	161		160 7A	180
36355	20:47:52	159		160 7A	180
36422	20:47:53	156		160 7A	180
36465	20:47:54	154		160 7A	180
36529	20:47:56	151		160 7A	180
36571	20:47:57	149		160 7A	180
36592	20:47:57	149		160 7Ax	180
36618	20:47:58	146		160 7Ax	180
36638	20:47:58	146		160 7Ax	180
36669	20:47:59	144		160 7Ax	180
36718	20:48:00	141		160 7Ax	180
36767	20:48:02	139		160 7Ax	180
36816	20:48:03	136		160 7Ax	180
36853	20:48:04	134		160 7Ax	180
36900	20:48:05	131		160 7Ax	180
36955	20:48:07	129		160 7Ax	180
36999	20:48:08	126		160 7Ax	180
37043	20:48:09	124		160 7Ax	180
37086	20:48:10	121		160 7Ax	180
37090	20:48:11	121		160 7Ax	180
37115	20:48:11	119		160 7Ax	180
37164	20:48:13	116		160 7Ax	180
37213	20:48:14	114		135 7Ax	180
37244	20:48:15	114		135 70	7A*
37252	20:48:16	114		135 70	7A*
37260	20:48:16	111		135 70	7A*

Sträcka	Tid	Hastighet	Bromstryck	Förindikator	Huvudindikator
(m)	HH:MM:SS	Spd	Bpr	Aux	Main
37276	20:48:16	111	135		7A*
37322	20:48:18	109	135		7A*
37367	20:48:19	106	135		7A*
37382	20:48:20	106	155		7A*
37389	20:48:20	106	185		7A*
37404	20:48:21	104	185		7A*
37433	20:48:22	101	165		7A*
37461	20:48:23	101	165		7A*
37468	20:48:23	99	165		7A*
37502	20:48:24	96	165		7A*
37524	20:48:25	95	165		7A*
37544	20:48:26	91	165		7A*
37607	20:48:28	89	165		7A*
37638	20:48:30	86	165		7A*
37668	20:48:31	84	165		7A*
37703	20:48:32	81	165		7A*
37731	20:48:34	79	165		7A*
37748	20:48:34	79	165		7A*
37759	20:48:35	76	165		7A*
37769	20:48:35	76	165		7A*
37790	20:48:36	74	165		7A*
37795	20:48:37	74	5		7A*
37841	20:48:39	71	5		7A*
37896	20:48:42	70	5		7A*
37901	20:48:42	70	5		7A*
37925	20:48:43	70	5		7A*
37930	20:48:44	70	5		7Ax
37940	20:48:44	70	5		70x
37949	20:48:45	70	5		70
37959	20:48:45	70	5		70
37983	20:48:46	70	5		70
37988	20:48:47	68	5		70
38063	20:48:51	65	5		70
38086	20:48:52	65	5		70
38176	20:48:57	63	5		70
38219	20:48:59	63	5		70
38219	20:49:00	61	5		70
38274	20:49:03	59	5		70
38307	20:49:05	59	5		115
38315	20:49:05	59	5	70	115
38339	20:49:07	59	80	70	115
38343	20:49:07	59	105	70	115
38356	20:49:08	56	105	70	115
38371	20:49:09	56	105	70	115
38379	20:49:09	56	125	70	115
38391	20:49:10	54	125	70	115
38417	20:49:12	51	125	70	115
38453	20:49:14	49	125	70	115
38456	20:49:15	49	145	70	115
38459	20:49:15	49	170	70	115
38466	20:49:15	49	195	70	115

Sträcka	Tid	Hastighet	Bromstryck	Förindikator	Huvudindikator
(m)	HH:MM:SS	Spd	Bpr	Aux	Main
38470	20:49:16	49	160	70	115
38476	20:49:16	46	140	70	115
38483	20:49:17	46	120	70	115
38505	20:49:18	44	120	70	115
38523	20:49:20	44	120	70	115
38526	20:49:20	44	80	70	115
38525	20:49:20	43	80	70	115
38527	20:49:21	43	60	70	115
38545	20:49:22	43	95	70	115
38548	20:49:22	43	135	70	115
38554	20:49:23	43	135	70	115
38554	20:49:23	40	135	70	115
38576	20:49:25	38	170	70	115
38579	20:49:25	38	190	70	115
38587	20:49:26	38	160	70	115
38589	20:49:26	35	140	70	115
38597	20:49:27	35	120	70	115
38611	20:49:28	35	120	70	115
38614	20:49:29	33	160	70	115
38616	20:49:29	33	185	70	115
38627	20:49:30	30	185	70	115
38633	20:49:31	30	215	70	115
38635	20:49:31	28	215	70	115
38645	20:49:32	25	215	70	115
38647	20:49:33	25	195	70	115
38650	20:49:33	25	220	70	115
38652	20:49:33	23	240	70	115
38657	20:49:34	20	240	70	115
38659	20:49:35	20	220	70	115
38661	20:49:35	20	200	70	115
38662	20:49:35	18	200	70	115
38668	20:49:36	15	200	70	115
38668	20:49:38	13	200	70	115
38673	20:49:39	10	200	70	115
38674	20:49:39	10	170	70	115
38678	20:49:41	8	170	70	115
38679	20:49:41	8	140	70	115
38681	20:49:42	8	120	70	115
38681	20:49:42	5	120	70	115
38682	20:49:43	5	100	70	115
38684	20:49:44	5	130	70	115
38684	20:49:44	5	150	70	115
38686	20:49:46	3	150	70	115
38686	20:49:46	3	90	70	115
38686	20:49:46	3	65	70	115
38686	20:49:46	3	45	70	115
38687	20:49:47	3	5	70	115
38683	20:49:47	0	5	70	115
38683	20:49:48	0	5	ooo	115
38683	20:49:50	0	5	ooo	115
38683	20:51:18	0	5	ooo	115

