
Projekt i Järnvägssystem & Spårfordon

4B1304

Principkonstruktion av ett snabbtåg
för regional trafik

Inlämningsdatum 2005-12-09

Kompletterad 2006-01-19

Kompletterad 2006-02-06



Av:

Florian Wieland
florianwieland@web.de

Johanna Andersson
johanna@kth.se

Sammanfattning

Ett tåg för snabb regionaltrafik skall konstrueras längs en tänkt bana. Här används Stadlers Flirt-tåg som utgångspunkt. Det resulterade i ett tåg bestående av två motorvagnar med en vagn i mitten. Längden på tåget är 58 m och nettovikten är 110 t . En tidtabell utformades, där bland annat anslutningstider vid slutstationer beaktades. Topphastigheten ligger på 220 km/h för att klara av tidtabellen. Tågets gångmotstånd beräknades för att få en realistisk tidtabell. Ett annat viktigt krav gäller resenärerna, dessa måste få sittplatser i tåget, även under högtrafik. Tåget rymmer totalt 216 passagerare. Tvärsnittsprofilen har anpassats enligt normalsektionen i det fria rummet för att inte tåget skall skrapa plattformen eller köra in i signaler och dylikt utmed spåret. Detta gav en tågbredd på $3,40\text{ m}$. Inredningen är uppbyggd så att passagerarna lätt kan ta sig av och på tåget. Dörrarnas bredd är $1,4\text{ m}$. Dessutom kan tåget förväntas vara komfortabelt med tillräckligt utrymme vid sittplatser. Hänsyn har också tagits till rörelsehindrade. Det finns två speciella platser för handikappade och golvnivån vid insteget i mellanvagnen är sänkt. För att energiförbrukningen skall hållas låg används återmatning. Energiförbrukningen är ungefär, inklusive återmatning, 48 MWh/dygn . Enligt den ekonomiska kalkylen är den totala kostnaden per år $102\text{ miljoner kronor}$. Ett Excel program skapades för att göra alla beräkningar.

Innehåll

Sammanfattning

Innehåll

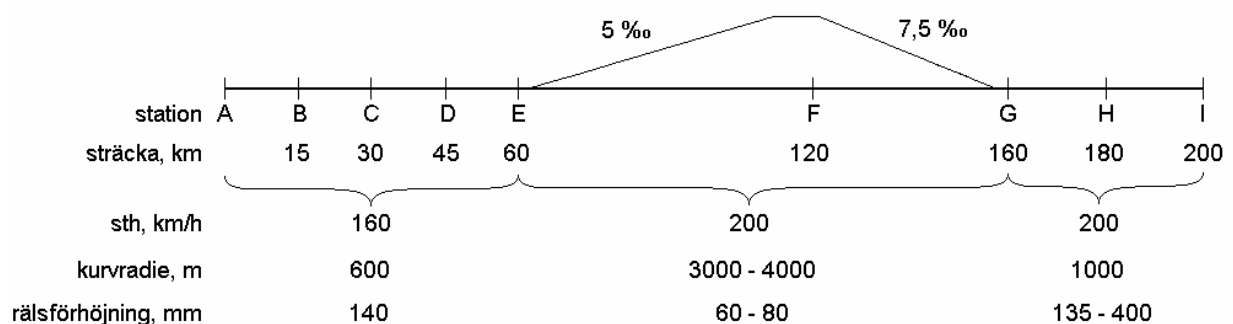
1. Inledning	4
2. Projektbeskrivning	4
3. Tågval	5
4. Beräkning av tidtabell	5
4.1 Beräkning av hastigheter	5
4.2 Gångmotstånd	6
4.2.1 Mekaniskt motstånd	7
4.2.2 Luftmotstånd	7
4.2.3 Kurvmotstånd	7
4.2.4 Stigningsmotstånd	7
4.2.5 Beräkning av det totala motståndet	8
4.3 Dragkraftsdiagram	8
4.4 Adhensionsutnyttjning	9
4.5 Start- och stopptillägg	10
4.6 Tidtabell	12
5. Energiberäkningar	12
5.1 Energiförbrukning	12
5.2 Återmatning	14
5.3 Totala energibehovet per dygn	16
6. Tågoncept	17
6.1 Tvärsnittsprofil	17
6.2 Inredningslayout	21
6.3 Tekniska system	23
6.4 Datablad för modifierat Flirt tåg	24
7. Ekonomisk kalkyl	25
8. Referenser	26
Bilaga 1: Ritning av tåget (3 blad)	i
Bilaga 2: Tidtabell (elektronisk form)	ii
Bilaga 3: Excel-fil (elektronisk form)	iii

1. Inledning

Projektet består av att konstruera ett tåg för snabb regionaltrafik längs en given linje. Syftet är att vi skall få en inblick i hur arbetet läggs upp vid en principkonstruktion av ett nytt tåg. Uppgiften är något förenklad men har ändå realistiska krav som måste beaktas.

2. Beskrivning av projektet

Linjen består av ett elektrifierat enkelspår, som dessutom har fjärrblockering och ATC. I Figur 2.1 visas banans förutsättningar från station *A* till *I*. På varsin sida om station *F* finns en stigning respektive ett utförslut.



Figur 2.1

Från stationerna *A* och *I* förekommer anslutande tåg varje jämn timme. Dessa ankommer på fasta minuttal 58 och avgår 02, vilket enligt regionaltåget måste anpassas. För tågbyte ansätts 8 minuter. Regionaltågets uppehåll på stationerna bör vara 1 minut med undantag för stationerna *E* och *G*, där uppehållstiden istället bör vara 2 minuter. I ändpunkterna, *A* och *I*, krävs en extra tidsmarginal på 1 minut. Växlarna vid mötesstationer tillåter en *sth* på 70 km/h. Med konsideration till störningskänslighet behövs ett tidstillägg på 5 minuter per 100 km.

På en tvåtimmarsperiod förväntas 400 resande. Vid högtrafik skall det helst gå ett tåg i timmen i varje riktning. Trafikeringen blir då 350 resenärer på de tåg som har anslutning och 200 på de övriga. Medelbeläggningen i tågen är 40 % av maximalt antal resenärer i högtrafik.

I tidtabellen skall även två godståg passas in. De skall gå från *A* runt 07.10 och starta tidigast från *I* 14.10. Godstågen skall vara tillbaka i *A* senast 17.45. Medelhastigheten för godståget är 80 km/h, med 1 minuts starttillägg och 30 sekunders stopptillägg. Vid 5 ‰ stigning ändras starttillägget till 2 minuter och vid en stigning av 7,5 ‰ blir tillägget istället 3 minuter.

Andra krav på tåget är att det bör vara moderna, komfortabla, ekonomiskt effektiva och handikappanpassade. Dessutom skall tågen ha tillräckligt med sittplatser för att rymma antalet resande i högtrafik plus en extra marginal på 10 %. Hänsyn måste även tas till inredningslayouten i tåget så att det finns utrymme för bagage och dylikt. Av- och påstigning bör kunna ske effektivt. Vid de större stationerna förväntas 30 % av resenärerna stiga av och på vid högtrafik. På de mindre stationerna väntas 10 % stiga av och på.

Energiförbrukningen och bullernivån bör vara låg. Utöver detta måste tågets tvärsnittsprofil rymmas i det fria rummet. Det bör passa in på plattformshöjder av 550 – 730 mm.

3. Tågval

För den givna sträckan behövs snabba tåg med en topphastighet mellan 200 km/h och 250 km/h. Vid regionaltrafik blir det en stor ökning av antalet resenärer vid högtrafik jämfört med övrig tid på dygnet. Eftersom det helst inte får finnas stående i tåget behövs det ett stort antal sittplatser som kan minskas vid behov. Därför har tidigt bestämts att använda breda tåg för att bättre kunna utnyttja det större svenska fria rummet. För att lätt kunna anpassa antalet sittplatser till mängden resenärer har mindre enheter, som kan kopplas ihop och isär vid behov, valts. Ett tåg som redan används för ett sådant fall är REGINA som tillverkades av Bombardier. Detta breda tåg trafikerar bland annat sträckorna mellan Stockholm och Mälardalen, med en topphastighet av 200 km/h. REGINA har tillverkats från och med år 2000. Ett annat tåg som har betraktats är FLIRT av tillverkaren Stadler, Schweiz. FLIRT har planerats som pendeltåg med en topphastighet av 160 km/h. Vid samma vikt har tåget mer effekt än REGINA. Dessutom är golvnivån, med 600 mm över rök, lägre. Tekniken är modernare hos FLIRT eftersom den är 5 år yngre än REGINA. Vi kontaktade både Stadler och Bombardier. Endast Stadler svarade och skickade värdefulla data och en ritning över tåget. På grund av detta samt den högre effektutnyttningen har vi slutligen valt att använda FLIRT.

4. Beräkning av tidtabell

4.1 Beräkning av tillåtna hastigheter

Tillåten hastighet beräknas med,

$$v_{till} = \frac{1}{2} \sqrt{2} \sqrt{\frac{R g (h_{b, till} + h_a)}{b_0}} \quad [4.1]$$

Tabell 4.1 Beräkning av de tillåtna hastigheterna

Delsträcka		A-B ¹	E-M1	M1-F	F-M3 ²	G-H ³
Längd	km	15	20	40	20	20
Max. rälsförhöjning	mm	150	80	80	80	140
Min. kurvradie	m	600	3000	3000	3000	1000
Max. signalhastighet	km/h	160	220	220	220	200
Möjlig hastighet (A)	km/h	112,76	213,94	213,94	213,94	142,63
Möjlig hastighet (B)	km/h	123,52	241,83	241,83	241,83	156,78
Möjlig hastighet (S)	km/h	141,73	287,47	287,47	287,47	180,64
Till. Hastighet (A)	km/h	110	210	210	210	140
Till. Hastighet (B)	km/h	120	220	220	220	155
Till. Hastighet (S)	km/h	140	220	220	220	180

¹ Sträckorna B-C, C-D och D-E har samma värden som denna

² Sträcka M3-G är samma som denna

³ Sträcka H-I är samma som denna

Möjliga hastigheter har beräknats för de tre olika fordonstyperna enligt Banverkets föreskrifter, se Tabell 4.1. För att beräkna den möjliga hastigheten används den specifika sträckans,

- längd
- rälsförhöjning
- kurvradie
- signalhastighet
- $g = 9,81 \text{ m/s}^2$
- $2b_0 = 1,5 \text{ m}$
- den tillåtna rälsförhöjningsbristen

I tabellen har den möjliga hastigheten avrundats. Resultatet är de tillåtna hastigheterna. Med formeln,

$$t = \frac{s}{v} \quad [4.2]$$

beräknas den teoretiskt möjliga körtiden. En additiv tidsmarginal av 5 minuter varje 100:e km har kompletterats och därigenom erhålls den minimala körtiden, enligt Tabell 4.2.

Tabell 4.2 Körtider

Delsträcka		A-B	E-M1	M1-F	F-M3	G-H
Längd	km	15	20	40	20	20
Teoretisk Körtid (A)	min	8,18	5,71	11,43	5,71	8,57
Teoretisk Körtid (B)	min	7,50	5,45	10,91	5,45	7,74
Teoretisk Körtid (S)	min	6,43	5,45	10,91	5,45	6,67
Min. Körtid (A)	min	8,93	6,71	13,43	6,71	9,57
Min. Körtid (B)	min	8,25	6,45	12,91	6,45	8,74
Min. Körtid (S)	min	7,18	6,45	12,91	6,45	7,67

För att beräkna restiden behövs start- och stopptillägg. Dessa kalkyleras med hjälp av gångmotståndet, vilket ges i nästa kapitel.

4.2 Gångmotstånd

Följande olika motstånd beaktas,

- Mekaniskt motstånd
- Luftmotstånd
- Kurvmotstånd
- Stigningsmotstånd

Följande funktion gäller,

$$D = A v^2 + B v + C \quad [4.3]$$

Där D är gångmotståndet. A , B och C är koefficienter som måste beräknas.

4.2.1 Kurvmotstånd

Kurvmotståndet uträknas med,

$$D_K = \frac{6.5 \left(1 - \frac{0.9 R^2 K_b}{R^2 + 30000} \right) m_T}{R - 55} \quad [4.4]$$

där m_T är tågvikten och K_b är graden av radialstyrning. Denna faktor har valts till 0,8 eftersom det valda tåget är jämförbart med ett Regina-tåg, som enligt Andersson och Berg [1] har detta värde på radialstyrningen. För att beräkna kurvmotståndet antas att 50 % av sträckorna ligger i kurvor med given radie, enligt Figur 2.1.

4.2.2 Mekaniskt motstånd

Det mekaniska motståndet fås av den empiriska formeln,

$$D_M = a \left(30 n_{ax} + \left(\sum_{i=1}^{n_{ax}} a_Q Q_i \right) \right) + \left(\sum_{i=1}^{n_{ax}} b_Q Q_i \right) v \quad [4.5]$$

Där första termen står för den oberoende delen och andra termen för den linjärt beroende delen. Variablerna a_Q och b_Q sätts till 0,0005 respektive 0,00001. Q_i är axellasten.

4.2.3 Luftmotstånd

För luftmotståndet gäller den empiriska formeln,

$$D_L = \frac{1}{2} \rho A C_D v^2 + (q + C_o L_T) v \quad [4.6]$$

där A är tågets tvärsnittsarea, $\sim 12 \text{ m}^2$, ρ är luftens densitet, $1,3 \text{ kg/m}^3$, q är ventilationsflödet i tåget, här vald till 1 kg/s , L_T är tåglängden och C_o är en koefficient som beror på aerodynamiska fenomen. Denna har satts till noll på grund av att vagnsmellanrummen i tåget är slutna.

Luftmotståndskoefficienten C_D beräknas med formeln,

$$C_D = C_p + C_L L_T \quad [4.7]$$

Luftmotståndet består av en från hastigheten linjärt beroende och en kvadratisk beroende del. C_p , tryckmotståndskoefficienten, har valts till 0,2, då bland annat tågets front är aerodynamiskt formad. Längdmotståndskoefficienten, C_L , har satts till $0,003 \text{ m}^{-1}$ eftersom tåget är relativt slätt utan utstickande detaljer.

4.2.4 Stigningsmotstånd

Fås med hjälp av

$$D_S = \frac{1}{1000} m_T g S \quad [4.8]$$

Stigningsmotståndet har inte beräknats generellt utan endast där det finns behov. **D är positiv om det är en stigning och negativ om det går ner.**

4.2.5 Beräkning av totalt motstånd

Tabell 4.3 nedan visar beräkningen av de olika motstånden.

Tabell 4.3 Beräkning av motstånd

Beroende av hastighet	Oberoende		Linjärt	Kvadratisk
Kurvmotståndet	Radie [m]	Motstånd [N]		
	600	440,00		
	3000	68,56		
	4000	50,99		
	1000	227,72		
Mekaniskt motstånd	701,985 N			
			13,4397 [kg/s] * V	
Luftmotståndet			1 [kg/s] * V	
				2,9172 [kg/m] * V²
Summa:	Radie [m]	Motstånd [N]	Linjärmotståndskoefficient: 14,4397 [kg/s²]	
	600	1141,99	Kvadratismotståndskoefficient: 2,9172 [kg/m]	
	3000	770,55		
	1000	929,70		

Som synes i tabellen ovan är motståndet uppdelat i oberoende, linjärt respektive kvadratisk. Den linjära och den kvadratiske delen innehåller endast koefficienter, som skall multipliceras med hastigheten i kvadrat. Med hjälp av hastigheten, som beräknas i Excel-filen, kan det totala motståndet för varje hastighet bestämmas. Vid beräkningen av starttilläggen har dock endast hänsyn tagits till luft- och stigningsmotståndet.

4.3 Dragkraftsdiagram

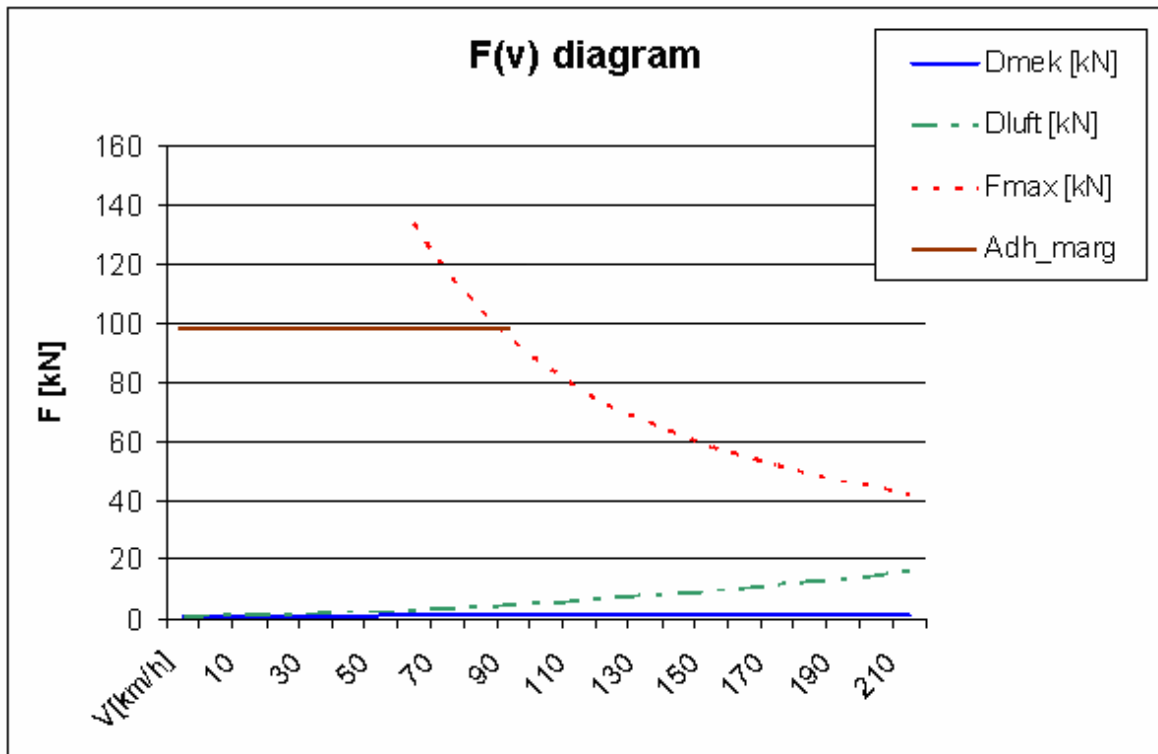
Det utvalda Flirt-fordonet har en effekt av 2600 kW . Tillverkaren anger möjlig acceleration vid start med 1 m/s^2 . Då topphastigheten höjds från 160 km/h till 220 km/h blir utväxlingen $1,375$. Genom denna faktor minskas accelerationen vid start. Den nya accelerationen blir $0,73 \text{ m/s}^2$ genom att dividera accelerationen med utväxlingen.

Startdragkraften beräknas med hjälp av formeln,

$$F = m_e a \quad [4.9]$$

där den ekvivalenta massan, m_e , är 137 t . F beräknas till $98,6 \text{ kN}$.

Med gångmotstånden ur Tabell 4.3 fås dragkraftsdiagrammet i Figur 4.1.



Figur 4.1, Dragkraftsdiagram

4.4 Adhensionsutnyttjning

För att kontrollera om det aktuella tågets värden är realistiska beräknas adhensionsutnyttjningen. Denna fås med hjälp av följande formler, som beräknar adhensionsutnyttjningen med broms respektive vid acceleration,

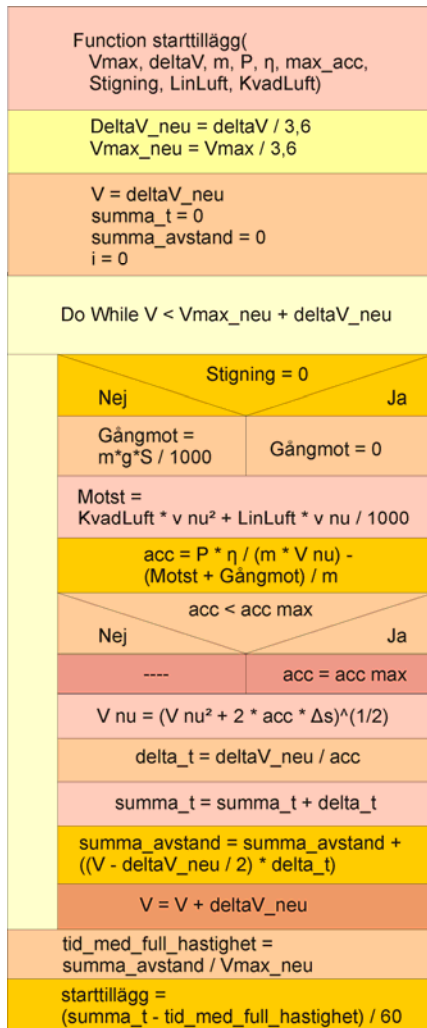
$$\alpha_{br} = \frac{r_{max}}{g} \quad [4.10]$$

$$\alpha_{acc} = \frac{m_e a_{max}}{n_d m_d g} \quad [4.11]$$

där n_d är antal drivna axlar, 4 st, och m_d motsvarar axlarnas massa, 16,8 t. Insättning av numeriska värden ger följande adhensionsutnyttjning, $\alpha_{br} = 0,10$ och $\alpha_{acc} = 0,15$, vilket verkar rimligt enligt kompendiet.

4.5 Start- och stopptillägg

Start- och stopptillägg beräknas genom ett Excel-Makro. Algoritmen till starttillägget finnes i Figur 4.2.



Förklaring av parametrar,

- V_{max} – hastigheten som tåget måste uppnå.
- $deltaV$ – hastighetssteg där beräkningen genomförs
- m – massa (dynamisk vikt + passagerarvikt = 137 t)
- η – effekt (= 2600 kW)
- P – verkningsgrad (är 1 eftersom effekten är given vid hjulet)
- max_acc – maximalt möjlig acceleration vid adhesionsgränsen, som för Flirt tåget är 0,73 m/s²
- $LinLuft$, $KvadLuft$ – Koefficienter som fås av Formel 3
- V_{max_neu} , $deltaV_neu$ – V_{max} och $deltaV$ som har omräknats från km/h till enheten m/s.
- Summa_t, summa_avsattand – Varje genomgång adderas den beräknade tiden och sträckan så att den totala storleken till slut erhålles.

Figur 4.2 Algoritm starttillägg

Ett exempel på startvärden, vilka ger starttillägget vid station A i positiv riktning,

- $V_{max} = 120 \text{ km/h}$
- $deltaV = 10 \text{ km/h}$
- $m (= m_e + m_p) = 137 \text{ t}$
- $P = 2600 \text{ kW}$
- $Max_acc = 0,73 \text{ m/s}^2$
- $Stigning = 0$
- $LinLuft = 58 \text{ kg/s}$
- $KvadLuft = 2,9172 \text{ kg/m}$

Resultatet blir ett starttillägg av 0,33 minuter + 1 minuter som tillskott = 1,33 minuter vid tågsätt B.

Stopptilläggen beräknas med konstant acceleration $acc = 1 \text{ m/s}^2$ och följande formler

$$t_{br} = \frac{V_{max}}{|acc|} \quad [4.12]$$

$$s_{br} = \frac{1}{2} \frac{V_{max}^2}{|acc|} \quad [4.13]$$

$$t_{s_utan_br} = \frac{s_{br}}{V_{max}} \quad [4.14]$$

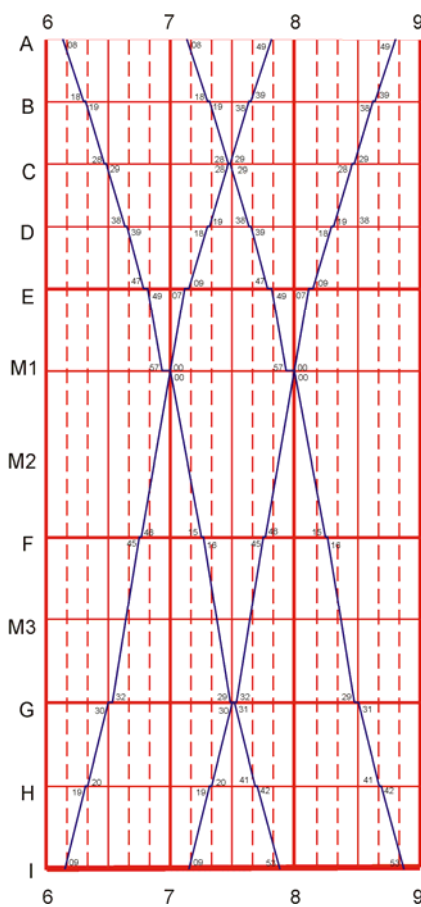
$$stopptillägg = t_{br} - t_{s_utan_br} \quad [4.15]$$

Exempelvis finns följande startvärden vid station B: $V_{max} = 120 \text{ km/h}$ och $|acc| = ret = 1 \text{ m/s}^2$. Då fås ett stopptillägg för tågsätt B av 0,28 minuter. Se Tabell 4.4 för en översikt över start- och stopptilläggen.

Tabell 4.4 Start- och stopptillägg

Körprofil Regionaltåg (B)						Körprofil Regionaltåg (S)					
V_{max}	Starttillägg (+)	Stoptillägg (-)	Körtid	Starttillägg (-)	Stoptillägg (+)	V_{max}	Starttillägg (+)	Stoptillägg (-)	Körtid	Starttillägg (-)	Stoptillägg (+)
km/h	min	min	min	min	min	km/h	min	min	min	min	min
220	1,33	1,28	8,25	0,33	0,28	250	1,40	1,00	7,18	0,40	0,32
	0,33	0,28	8,25	0,33	0,28		0,40	0,32	7,18	0,40	0,32
	0,33	0,28	8,25	0,33	0,28		0,40	0,32	7,18	0,40	0,32
	0,33	0,28	8,25	0,33	0,28		0,40	0,32	7,18	0,40	0,32
	0,84	0,51	6,45	0,75	0,51		0,84	0,51	6,45	0,87	0,51
	0,87	0,51	6,45	0,75	0,51		0,87	0,51	6,45	0,87	0,51
	0,87	0,51	6,45	0,80	0,51		0,87	0,51	6,45	0,87	0,51
	0,75	0,51	6,45	0,91	0,51		0,75	0,51	6,45	0,73	0,51
	0,73	0,51	6,45	0,86	0,51		0,73	0,51	6,45	0,73	0,51
	0,46	0,36	8,74	0,46	0,36		0,57	0,42	7,67	0,57	0,42
	0,46	0,36	8,74	1,46	1,36		0,57	0,42	7,67	1,57	1,42

4.6 Tidtabell



Figur 4.3
Tidtabellsläge och tågmöte
av regionaltågen

För att uppställa tidtabellen och bestämma tågmöten har en Excel-tabell arbetats fram, vilken beräknar körprofilen med värdena från Tabell 4.4. Genom att variera avgångstider och uppehållstider fås tidtabellsläget i Figur 4.3. Tågmöten skall alltid ske i *M1* och i *C* och *G* endast vid timmestrafik. Eftersom tidtabellen fungerar med tågsätt *B*, tycks korglutning onödig.

På stationerna *C*, *M1* och *G* skall infarterna byggas om så att växlarna är symmetriska. Därigenom kan tillskotten av tid för växlar i sidoläget försummas och tidtabellen blir stabilare eftersom det finns mer marginal med tid för tågmöten.

Restid mellan *D* och *E* förkortas från 9 till 8 minuter i positiv riktning för att försäkra om tågmöte i *M1*. Tågen kommer att vara en aning för sent i *E*, men tågen kan lämna stationen så snart som av- och påstigning avslutats.

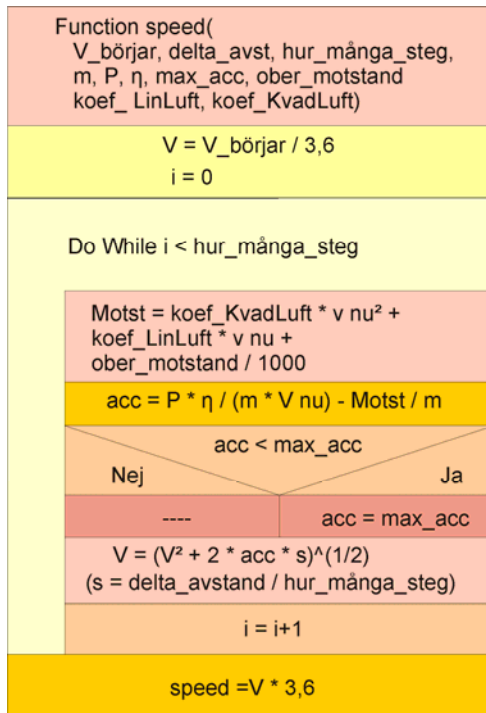
Godstågen planeras med körtiderna i Tabell 2 och de givna start- och stopptilläggen. För att klara godstågen med givna krav behövs ytterligare en mötesstation, *M3*.

Färgning av tåglinjerna ger en överblick över hela tidtabellen och nödvändigt antal tågsätt kan enkelt räknas. Kraven om timmestrafik och två antal tågsätt varannan timme vid högtrafik ger 6 stycken tågsätt. Det fordras dessutom ett reservtåg, vilket ger det totala antalet tågsätt till 7. De adderade körtimmarna är 53 h per dygn. Hela tidtabellen finns i Bilaga 1.

5. Energiberäkningar

5.1 Energiförbrukning

Förbrukningen beräknas genom att modellera hela resan. Varje 100:e meter beräknas den aktuella hastigheten. Vid accelerationen används en modifierad algoritm utgående från programmet enligt Figur 4.2. Programmet för energiförbrukningen visas i Figur 5.1. Programmet kalkylerar hastigheten varje meter så att resultatet blir tillräckligt noggrant.

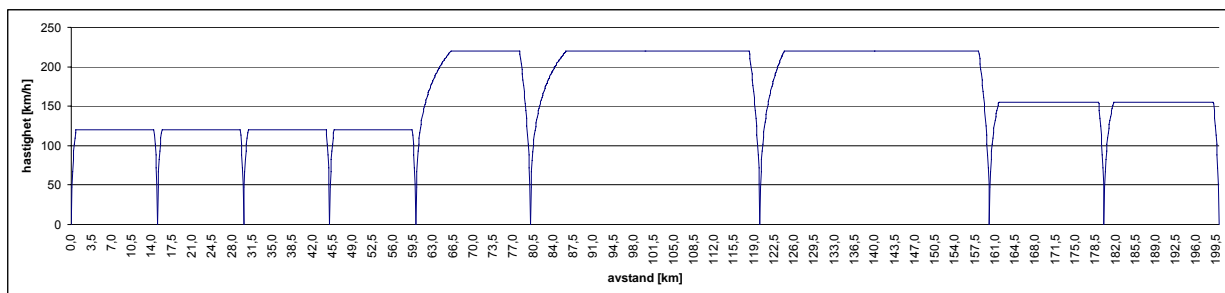


Figur 5.1 Algoritm Speed

Parametrarna i programmet är som följer,

- $V_börjar$ – hastigheten som tåget redan har uppnått
- $Delta_avst$ – efter vilken sträcka hastigheten skall utges
- $Hur_många_steg$ – hur många beräkningsgenomgångar skall genomföras förrän resultatet lämnas ut

I denna beräkning läggs stigningsmotståndet tillsammans med de andra motstånden i en enda parameter. Resultatet av hastighetsmodelleringen för en resa i positiv riktning visas i Figur 5.2.

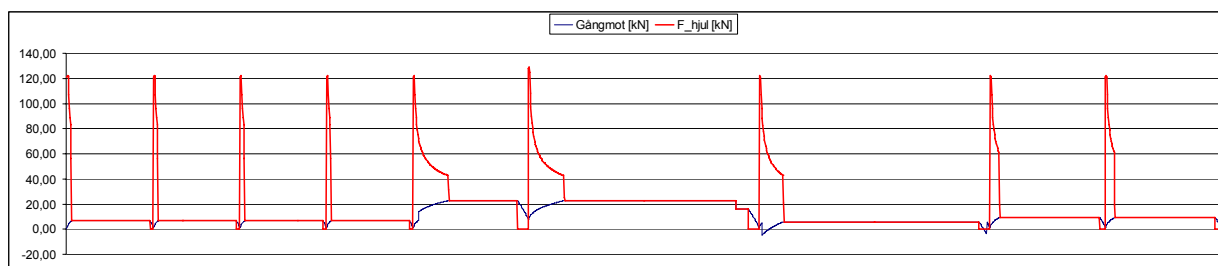


Figur 5.2 Hastighetsförlopp

Med följande två formler fås kraftförloppet, se Figur 5.3,

$$a = \frac{v_2^2 - v_1^2}{s} \quad [5.1]$$

$$F = a m + D \quad [5.2]$$



Figur 5.3 Kraftförlopp och gångmotstånd

Med nästkommande formel beräknas effekten,

$$P_i = F_i * (v_i + v_{i-1}) / 2 \quad [5.3]$$

Den maximala kontinuerliga effekten behövs i negativ riktning vid stigningen av 7,5 %. Effektbehovet där är 1594 kWh. Tåget kan klara 2000 kWh som kontinuerligt effekt.

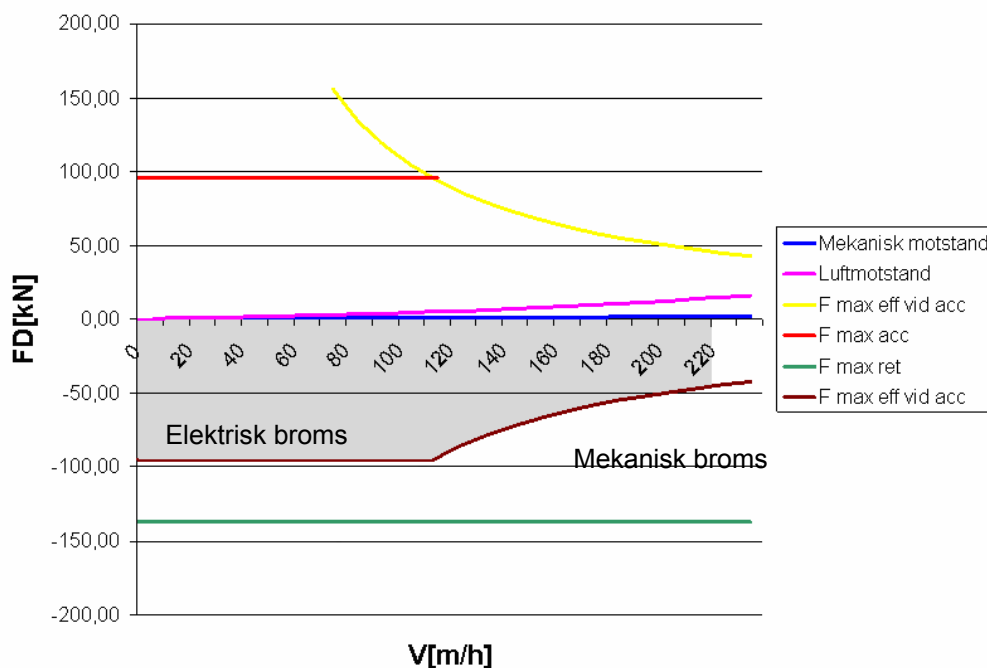
Energibehovet vid hjulaxeln för hela resan fås med formel,

$$\sum W_i = F_i \Delta s_i \quad [5.4]$$

Detta behov blir 816 kWh, 767 kWh i negativ riktning. Efter tillskott av komfortenergin (40 kWh), förluster inom fordon (verkningsgrad antas med 0,8) och återmatningen (verkningsgrad antas med 0,8) blir energiuttaget från elnätet vid strömavtagare slutligen 1070 kWh i positiv riktning och 1093 kWh i negativ riktning. Verkningsgrad inom elnätet antas med 0,8. Det måste alltså matas ännu mer energi in i elnätet. Energiförbrukningen av ett tåg i positiv riktning blir då 1337 kWh (neg: 1366 kWh).

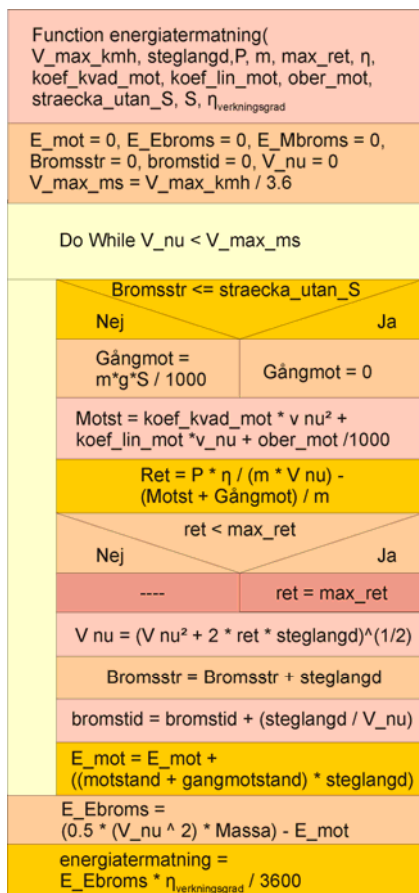
5.2 Återmatning

Med hjälp av det utvidgade dragkraftsdiagrammet i Figur 5.4 kan återmatningen bestämmas.



Figur 5.4, Dragkraftsdiagram kompletterat med bromskrafter

Energien som kan användas för återmatning finns mellan hastighetsaxeln och den negativa effektkurvan, se det grå området i Figur 5.4. **Bromskraften från den elektriska bromsen kan inte vara större än dragkraften.** Om en konstant retardation vill uppnås måste bromskraften kompletteras genom att använda ytterliggare en broms. Det blir här en mekanisk skivbroms, som omvandlar energin till värme. **Bromskraften kan vara större än dragkraften därför att alla axlar är bromsad emellertid är inte alla axlar drivna (förändrad adhesionsvikt).** För att beräkna återmatningen antas en verkningsgrad av 0,8. Även för att beräkna återmatningen används ett program enligt Figur 1, dock modifierat. En överblick av programmets uppbyggnad visas i Figur 5.5.



Förklaring av parametrarna,

- v_max_kmh – utgångshastighet
- $steglängd$ – efter vilket avstånd beräkningen skall upprepas
- $straeca_utan_stigning$ – avstånd från stationsmitt till början av stigningen
- S – stigning
- E_mot – summerad energi som beror av motståndskrafter
- E_broms – summerad energi som beror av elektrisk broms. Den här energin används för återmatningen.

Figur 5.5 Algoritm återmatning

I Tabell 5.1 åskådliggörs resultatet. Steglängden ansätts till 0,1 m.

Station	V_max	bara E-Broms		med M-Broms		delta
		stopptilläg	atermatars	atermatars	stopptilläg	
		min	kWh	kWh	min	-
A-	120	0,38	16,42	11,81	0,28	0,10
B+	120	0,38	16,42	11,81	0,28	0,10
B-	120	0,38	16,42	11,81	0,28	0,10
C+	120	0,38	16,42	11,81	0,28	0,10
C-	120	0,38	16,42	11,81	0,28	0,10
D+	120	0,38	16,42	11,81	0,28	0,10
D-	120	0,38	16,42	11,81	0,28	0,10
E+	120	0,38	16,42	11,81	0,28	0,10
E-	220	0,79	54,54	30,36	0,51	0,28
M1+	220	0,75	46,32	30,36	0,51	0,24

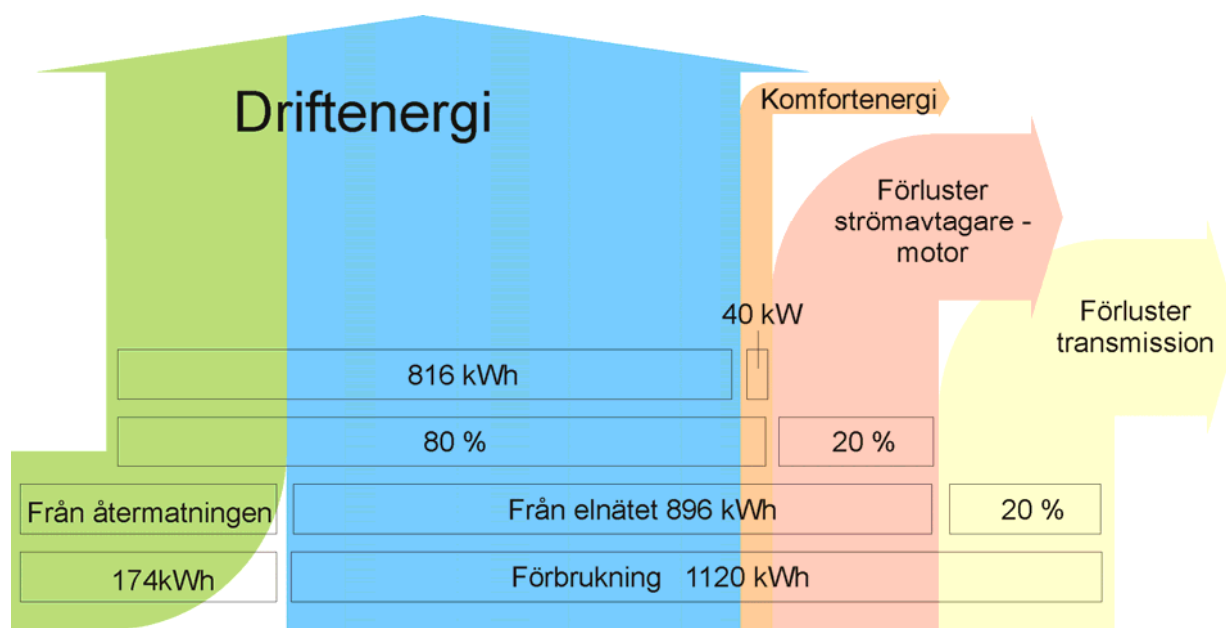
M1-	220	0,80	56,06	30,36	0,51	0,29
F+	220	0,77	50,76	30,36	0,51	0,26
F-	220	0,74	45,45	30,36	0,51	0,23
G+	220	0,79	55,61	30,36	0,51	0,28
G-	155	0,50	26,85	17,90	0,36	0,14
H+	155	0,50	26,85	17,90	0,36	0,14
H-	155	0,50	26,85	17,90	0,36	0,14
I+	155	0,50	26,85	17,90	0,36	0,14
Summa positiv riktning			272,08	174,13	kWh	1,48 kWh
Summa negativ riktning			219,38	143,77	kWh	1,21 kWh

Tabell 5.1 Resultat av återmatningsberäkningar

För att erhålla en konstant och hög retardation vid bromsning måste förutom elektrisk broms en mekanisk broms användas. Den återmatade energin blir alltså lägre, då hela energin från den mekaniska bromsen omvandlas till värme.

5.3 Totala energibehovet per dygn

Figur 5.6 visar fördelningen av energiförbrukningen i positiv riktning.



Figur 5.6 Energidiagram

Tabell 5.2 visar den totala energiförbrukningen per dygn enligt tidtabellen. Förbrukningen, som skall betalas, räknas vid strömavtagaren.

	Energiförbrukning	
Antal tåg i positivt riktning:	17	15235 kWh
Antal tåg i negativt riktning:	17	15545 kWh
Antal tåg A-E:	8	1617 kWh
Antal tåg G-I:	8	1521 kWh
Alla:		33 MWh/dygn

Tabell 5.2 Energiförbrukning per dygn

6. Tågkoncept

6.1 Tvärsnittsprofil

För att få en korrekt tvärsnittsprofil av tåget måste hänsyn tas till fordonets maximalt möjliga sidoförskjutning och sidoutslag i kurvor för att erhålla den maximala bredden, nedfjädring och hjulslitage för den undre begränsningen och höjden på tåget för den övre begränsningen. För att beräkna den tillåtna bredden användes standardmetod SJF 400.7, enligt Andersson och Berg [1]. Denna metod är något begränsad då fordonets dimensioner och utslag schablonartat med antaganden om teoretiskt maximalt ogynnsamma rörelser beräknas, utan tanke på realitet.

Med anseende på sidoutslaget beräknas den tillåtna största bredden av tåget med formel,

$$b_i \leq b_N + D_{iN} - D_i \quad [6.1]$$

där b_N är normalfordonets bredd, D_{iN} är normalfordonets maximala sidoutslag vid fordonsmitt och D_i är det aktuella fordonets maximala sidoutslag vid fordonsmitt. Följande formel används för att kalkylera det maximala sidoutslaget vid parallellförskjutning inåt kurvan för både normalfordonet och det aktuella fordonet,

$$D_{i, iN} = \frac{1}{8} \frac{a_N^2 + a_{pN}^2}{R} + c_N \quad [6.2]$$

där a_N är normalfordonets boggiavstånd, a_{pN} är axelavståndet i boggierna hos normalfordonet, se Tabell 7 för värden, $R = 150 \text{ m}$ och c_N är den totala maximala sidorörligheten, enligt formel,

$$c_N = y_{kpN} + y_{psN} \quad [6.3]$$

där de olika maximala sidorörligheterna kan ses i Tabell 6.1. De beräknade värdena för det tillåtna breddmättet visas i Tabell 6.2 nedan. Även den främre bredden på fordonet måste beaktas då det är denna som riskerar att sticka ut ur kurvorna vid full diagonalställning. För detta används formel,

$$b_y \leq b_N + D_{yN} - D_y \quad [6.4]$$

där det maximala sidoutslaget vid dimensionerande längd vid full diagonalställning för både normalfordonet och det aktuella fordonet, D_{yN} respektive D_y beräknas med formel,

$$D_{y, yN} = \frac{1}{8} \frac{a_{kN}^2 - a_N^2 - a_{pN}^2}{R} + \frac{c_N a_{kN}}{a_N} \quad [6.5]$$

a_{kN} och a_k är den dimensionerade längden för normalfordonet respektive Flirt tåget. Värdena som används vid beräkningarna visas i Tabell 6.1. Resultaten av uträkning av b_y visas i Tabell 6.2.

Tabell 6.1 Fordonsdata

Normalfordonet:	
Dimensionerande längd, a_{kN}	24 m
Boggiavstånd, a_N	18 m
Axelavstånd i boggier, a_{pN}	2 m
Max sidorörlighet korg-hjulpar, y_{kpN}	0,035 m
Max sidorörlighet spårmitt-hjulpar ($R \geq 250m$), y_{psN}	0,0175 m
Max sidorörlighet spårmitt-hjulpar ($R \leq 150m$), y_{psN}	0,028 m

Aktuellt fordon (mellanvagn):	
Dimensionerande längd (mellanvagn), a_k	16 m
Boggiavstånd, a	16 m
Axelavstånd i boggier, a_p	2,7 m
Max sidorörlighet korg-hjulpar, y_{kp}	0,035 m
Max sidorörlighet spårmitt-hjulpar ($R \geq 250m$), y_{ps}	0,0175 m
Max sidorörlighet spårmitt-hjulpar ($R \leq 150m$), y_{ps}	0,028 m

I Tabell 6.2 ses resultatet av beräkningarna av den tillåtna bredden vid fordonsmitt och vid dimensionerad längd. Den beräkning som ger det minsta maximala tillåtna breddmåttet är markerad som fet i tabellen. Alltså **3,40 m**. Ändvagnarnas dimensionerande längd är **20 m**, de är således **4 m** längre än mellanvagnen. Detta påverkar dock inte resultatet av beräkningen av den tillåtna bredden.

Tabell 6.2, Resultat av beräkning av den tillåtna bredden

[m]		Höjd	0,13	0,43	0,43 - 0,76	0,76 - 3,64	4,65
		Normalfordonets halva bredd	1,22	1,50	1,58	1,70	0,69
Mellan- och ändvagn							
Sidoutslag vid fordonsmitt	R = 150 m	Normalfordon, D_{iN}	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34
		Aktuellt fordon, D_i	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28
		Tillåten halv bredd, b_i	1,28	1,56	1,64	1,76	0,75
		Tillåten bredd, $2b_i$	2,56	3,12	3,28	3,52	1,50
	R = ∞	Normalfordon, D_{iN}	0,053	0,053	0,053	0,053	0,053
		Aktuellt fordon, D_i	0,053	0,053	0,053	0,053	0,053
		Tillåten halv bredd, b_i	1,22	1,50	1,58	1,70	0,69
		Tillåten bredd, 2 b_i	2,44	3,00	3,16	3,40	1,38
Ändvagn							
Sidoutslag vid dimensionerad längd	R = 150 m	Normalfordon, D_{yN}	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29
		Aktuellt fordon, D_y	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19
		Tillåten halv bredd, b_y	1,32	1,60	1,68	1,80	0,79
		Tillåten bredd, $2b_y$	2,64	3,20	3,36	3,60	1,58
	R = ∞	Normalfordon, D_{yN}	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
		Aktuellt fordon, D_y	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
		Tillåten halv bredd, b_y	1,23	1,51	1,59	1,71	0,70
		Tillåten bredd, $2b_y$	2,46	3,02	3,18	3,42	1,40

D_y är litet då överhänget vid den dimensionerade längden enbart är 2 m. Vid fordonets undre begränsning måste hänsyn tas till hjulslitage och nedfjädring. Enligt Andersson och Berg [2], kan hjulslitage antas till 45 mm och den maximala nedfjädringen till 70 mm, se Tabell 6.3. Det minsta tillåtna höjdmåttet vid fordonsmitt och vid dimensionerande längd kan nu räknas ut med följande två formler,

$$f_i = f_N - d_{iN} + d_i \quad [6.6]$$

$$f_y = f_N - d_{yN} + d_y \quad [6.7]$$

där f_N är avståndet från r ö k till nedre begränsningslinjen hos normalfordonet. För vagnar är $f_N = 130 \text{ mm}$. Normalfordonets och det aktuella fordonets horisontella utslag vid fordonsmitt, d_{iN} respektive d_i ges av,

$$d_{i, iN} = \frac{a_N^2 + a_{pN}^2}{8 R} \quad [6.8]$$

samt normalfordonets och det aktuella fordonets horisontella utslag vid dimensionerande längd, d_{yN} och d_y ges av formel,

$$d_{y, yN} = \frac{a_{kN}^2 - a_N^2 - a_{pN}^2}{8 R} \quad [6.9]$$

I båda formlerna [6.8] och [6.9] används radien $R = 500 \text{ m}$. Resultatet visas i Tabell 6.3. Den största undre begränsningen är markerad med fet stil i tabellen.

Tabell 6.3, Tågets undre begränsning

[m]		Avstånd från r ö k		
		Normalfordonets avstånd, f_N	0,13	0,43
Utslag vid fordonsmitt	Normalfordon, d_{iN}	0,08	0,08	0,08
	Aktuellt fordon, d_i	0,07	0,07	0,07
	Tillåtet avstånd (aktuellt fordon), f_i	0,11	0,41	0,74
	Tillåtet avstånd inkl nedfjädring + hjulslitage, f_i	0,23	0,53	0,86
Utslag vid dimensionerad längd	Normalfordons, d_{yN}	0,06	0,06	0,06
	Aktuellt fordon, d_y	0,02	0,02	0,02
	Tillåtet avstånd (aktuellt fordon), f_y	0,08	0,38	0,71
	Tillåtet avstånd inkl nedfjädring + hjulslitage, f_y	0,20	0,50	0,83

Den övre begränsningen beräknas på samma sätt som bredden. Det vill säga enligt,

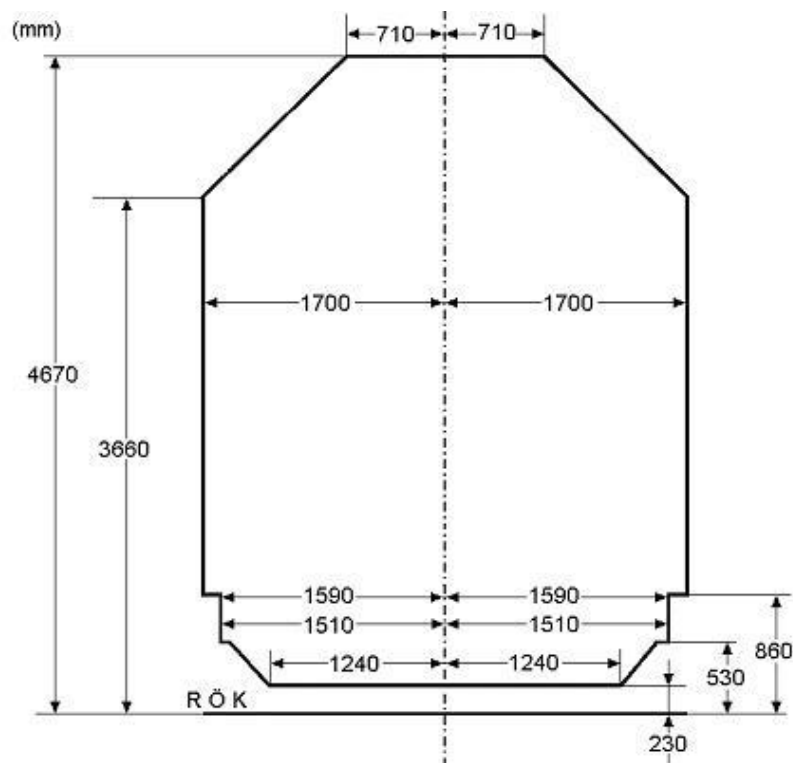
$$f_{i,y} = f_N + d_{iN,yN} - d_{i,y} \quad [6.10]$$

Resultatet visas i Tabell 6.4. Den lägsta tillåtna höjden är markerad i tabellen.

Tabell 6.4, Tågets övre begränsning

[m]		Total höjd	
	Normalfordonets höjd, f_N	4,65	3,64
Utslag vid fordonsmitt	Normalfordon, d_{iN}	0,08	0,08
	Aktuellt fordon, d_i	0,07	0,07
	Tillåten höjd, f_i	4,67	3,66
Utslag vid dimensionerad längd	Normalfordon, d_{yN}	0,06	0,06
	Aktuellt fordon, d_y	0,02	0,02
	Tillåten höjd, f_y	4,70	3,69

I Figur 6.1 visas tågets lastprofil med hänsyn taget till den undre och övre begränsningen samt den tillåtna bredden.



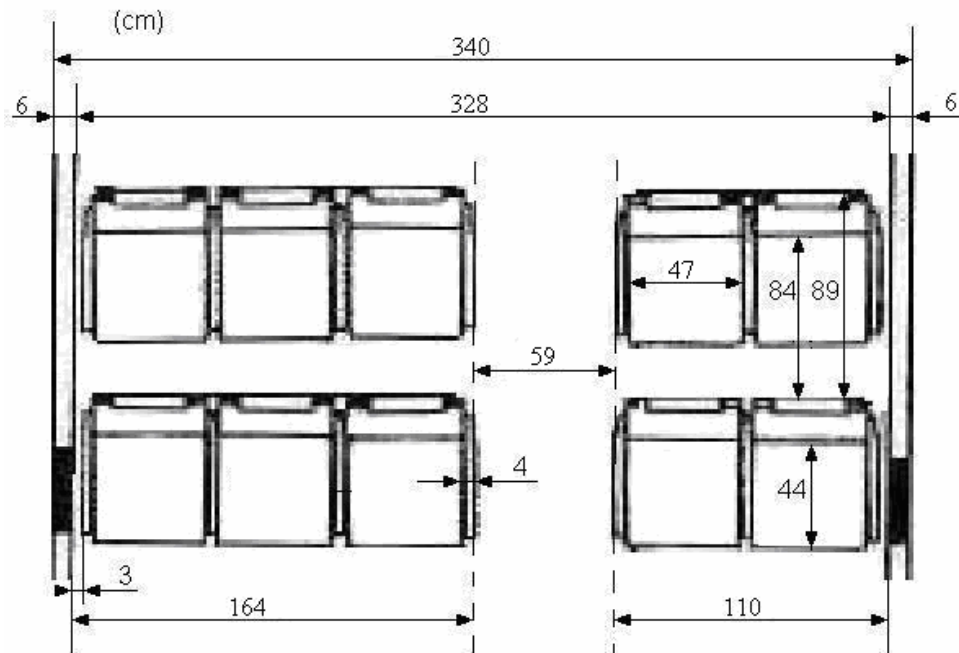
Figur 6.1, Lastprofil

Eftersom hela bredden blott kan användas ovanför 860 mm över r ö k har golvet höjts från 600 mm till 800 mm. Annars skulle det inte vara möjligt att ha en 3 + 2 anordning vid sittplatser.

Däriigenom måste av- och påstigningskoncept för handikappade arbetas om, vilket görs i kapitel 6.2.

6.2 Inredningslayout

Figur 6.2 visar hur utrymmet är disponerat för sittplatserna i tåget. De viktigaste faktorerna är bredden på sittplatsen och mittgången. Stolarna skall vara komfortabla och gångens bredd skall underlätta för personer med väskor att ta sig fram. **Prioritering av stolsbredden ger att det endast finns ett armstöd mellan två säten.**



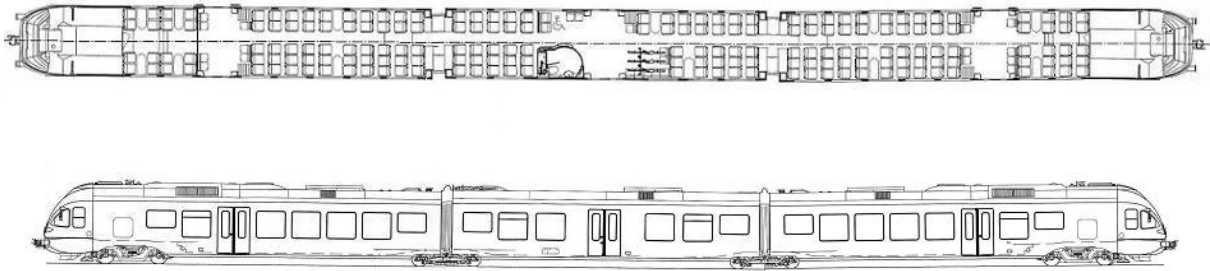
Figur 6.2, Fördelning av bredden

Som synes i Tabell 6.2 är den största tillåtna bredden vid fordonsmitt 3,40 m. Tjockleken på tågets väggar antas till 6 cm. Detta ger en stolsbredd på 47 cm, se Tabell 6.5.

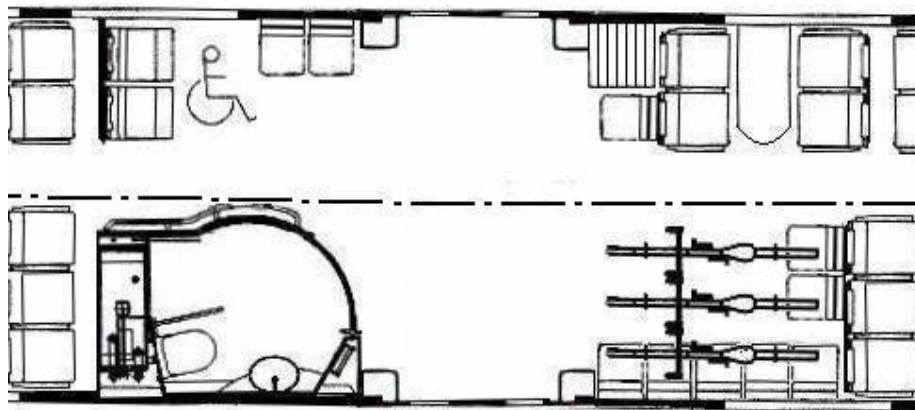
Tabell 6.5, Fördelning av bredden

Inre bredd med vägg tjocklek 6 cm	328 cm
Mittgång (rekommenderad)	59 cm
Armstödsbredd (rekommenderad)	4 cm
Mellanrum mellan armstödet och väggen (rekommenderad)	3 cm
Stolsbredd	47 cm

Tåget består av te vagnar varav de två yttersta är motorvagnar, se Figur 6.3. Varje vagn har en dörr med en bredd på 1,4 m, vilket gör av- och påstigningen mer effektiv. Vid varje utgång finns det hyllor för placering av större bagage. I första vagnen finns en avdelning för 1:a klass. Här är sittplatserna vända mot varandra med ett bord emellan. I det övriga tåget är platserna placerade bakom varandra med undantag för åtta tillfällen då de är vända mot varandra med ett bord i mitten. Stolarna i medsittning har ett mindre nedfällbart bord på det framförvarande sätets rygg. I mitten av mellanvagnen finns en toalett, platser för handikappade samt utrymme för exempelvis cyklar och barnvagnar, se Figur 6.4 för en förstorad bild. En större bild över hela tåget återfinns i Bilaga 2.



Figur 6.3, Överblick över tågsammansättningen



Figur 6.4, Förstorad bild över mellanvagnens mittdel

Antalet sittplatser är fördelade enligt Tabell 6.6 nedan. Som ses i tabellen är det totala antalet sittplatser 216, vilket stämmer ungefär med antalet resande på tåg som inte har anslutning, det vill säga 220 med de extra 10 % inräknade. Som det nämnts tidigare kommer två tåg att kopplas ihop vid högtrafik. Detta resulterar i totalt 432 sittplatser. Antalet förväntade resenärer vid högtrafik är känt till 385 per timme med inräknad extra marginal. Dessa passagerare ryms gott och väl i två tåg. Sittplatserna för handikappade är något större än de andra och kan fällas så att rullstolsbundna kan välja att sitta i rullstolen på samma plats.

Tabell 6.6, Sittplatser

1:a klass	16
2:a klass	174
Handikapp platser	2
Fällbara stolar	24
Totalt antal sittplatser	216

För att underlätta för handikappade och framförallt för rullstolsbundna personer är dörren i mellanvagnen sänkt. Golvnivån innanför dörren sänks genom en lutad yta till 650 mm över r ö k. Då lägsta plattformen är 550 mm över r ö k blir skillnaden 100 mm. Till den högsta plattformen är skillnaden 80 mm. I de fall där rullstolsbundna inte klarar att ta sig in eller ut ur tåget finns en knapp för att tillkalla tågpersonal. Vid behov kan en ramp skjutas och vecklas ut, helst av tågpersonal. **Utrymme för personal finns i ändarna i tåget.**

6.3 Tekniska system

Tåget ska vara utrustat med elektrisk broms, mekanisk skivbroms och magnetskenbroms. Den sistnämnda används dock bara vid snabb inbromsning. Två asynkronmotorer driver första och sista boggin. Det finns två löpboggier som är utformade som jakobsboggier. Tåget återmatar bromsenergin. En datorsimulerad modell av tågsättet skulle kunna visa olika ljudkällor. Dessa kan sedan åtgärdas med olika metoder. En åtgärd för att minska bullernivån kan vara att använda hjul med ljudabsorbenter. Underredet borde dessutom vara inkapslat för att minska både luftmotståndet och buller. En annan viktig faktor i bullerbekämpningen är ljudisolering av dörrar och fönster. I det hastighetsområde där tåget används kan den aerodynamiska utformningen bidra till den externa ljudnivån. Då det är komplicerat att ändra utformningen kan istället ytskiktet behandlas på olika sätt för att minska luftmotståndet.

6.4 Datablad för modifierat Flirt tåg

Axelföljd	Bo' 2' 2' Bo'
sth	220 km/h
Effekt	2600 kW
Kontinuerlig effekt	2000 kW
Tågvt	110 t
Dynamisk bruttotågvt	137 t
Max acceleration	0,73 m/s ²
Max retardation	1 m/s ²
Golvnivå vid insteg	
motorvagn	770 mm
mellanvagn	650 mm
Dörrbredd	1,4 m
Tåglängd	58 m
Tågets bredd	3,40 m
Boggiavstånd	16 m
Axelavstånd	2,7 m
Stolsbredd	45 cm
Mittgång	53,5 cm
Sittplatser	
1:a klass	16
2:a klass	174
Handikapp platser	2
Fällbara stolar	24
Totalt	216
Längsgående tryckkraft	1500 kN
Utväxling	1,375
Adhensionsutnyttjningskoefficient	
Vid acceleration	15%
Vid bromsning	10%



7. Ekonomisk kalkyl

Tabell 7.1 visar en ekonomisk kalkyl. Antalet körtimmar per dag har räknats till 53. Energipriset som används är 47,5 öre/kWh. Som tabellen visar uppgår den totala kostnaden per år till ungefär 140 miljoner kronor.

Tabell 7.1, Ekonomisk kalkyl

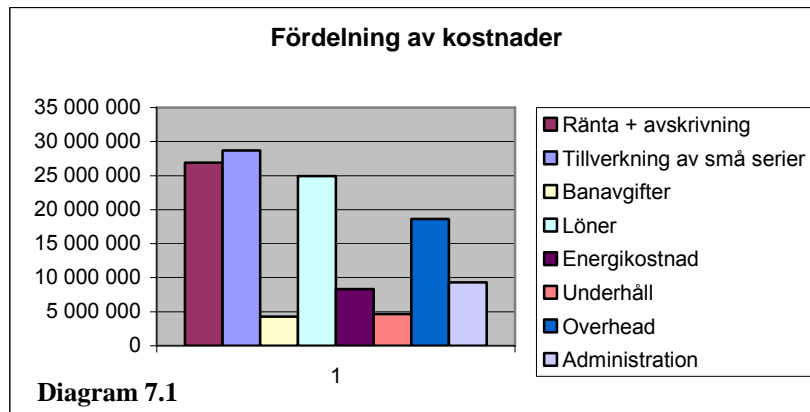
Inköpspris

2 st	motorvagn snabbtåg		32 000 000 kr
	personvagn		9 000 000 kr
		Totalt/tågsätt	41 000 000 kr
7 st	Tågsätt varav ett i reserv	Totalt	287 000 000 kr
	Tillverkning av små serier	10 %, 25 år	31 618 237 kr
		Totalt inköpspris	318 618 237 kr

Kostnader

Ränta + avskrivning	8%, 25 år	29 847 767 kr
Banavgifter	Slitage: 0,86 öre/bruttotonkm Trafikantinfo: 0,2 öre/bruttotonkm Olyckor: 110 öre/tågkm Totala banavgifter	1 826 898 kr 424 860 kr 2 007 500 kr 4 259 258 kr
Löner	Lokförare 700 kr/tidtabellstimme per dag Tågmästare 400 kr/tidtabellstimme per dag Tot lönekostnad/dag Tot lönekostnad/år	37 100 kr 31 200 kr 68 300 kr 24 929 500 kr
Energikostnad	Energikostnad/dag Energikostnad/år	16.112 kr 5.880.791 kr
Underhåll	5%	14 350 000 kr
Overhead	20%	18 617 927 kr
Administration	10%	9 308 963 kr
	Total kostnad/år	98.742.511 kr

Vid högtrafik då tågen körs dubbla finns det två tågmästare ombord för att kunna hantera det stora antalet resenärer. I Diagram 7.1 åskådliggörs fördelningen av kostnaderna. Den största kostnaden är således att tillverka i små serier, tätt följt av ränta och avskrivning.



Tabell 7.2, Intäkter

	2 440	resande/dag
	178 120 000	personkm/år
Intäkter	106 872 000	kr/år

I Tabell 7.2 ses de totala intäkterna per år, *107 miljoner kr*. Varje resande betalar *0,60 kr/km*. Det är ett genomsnittligt pris då normalpriset är dyrare och rabatter erhålls för bland annat pensionärer och barn. Således blir vinstprocenten ungefär *7 %*. Det finns möjligheter att optimera den ekonomiska kalkylen när de verkliga resandeförhållandena blir kända.

9. Referenser

- [1] Andersson, Berg – Järnvägssystem och spårfordon – Del 1 Järnvägssystem, Del 2 Spårfordon, Järnvägsgruppen KTH, 2003
- [2] Andersson, Projektpek, *Att göra en principkonstruktion av ett snabbtåg för regional trafik*, Järnvägsteknik KTH, 2005
- [3] <http://www.stadlerrail.com/>