

Höghastighetsjärnväg

– En hastighetsstudie på sträckan Lund-Stockholm



LUNDS
UNIVERSITET

Lunds Tekniska Högskola

LTH Ingenjörshögskolan vid Campus Helsingborg
Byggteknik - Järnvägsteknik

Examensarbete:
Nazer Hamidi
Martin Wiman

© Copyright Nazer Hamidi, Martin Wiman

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 2017

Sammanfattning

I syfte att tillfredsställa det ökade transportbehovet i Sverige planeras den nya höghastighetsjärnvägen för att stå färdig 2035. Höghastighetsjärnvägen ska knyta samman Stockholm, Göteborg, Malmö och ett antal mellanliggande orter med en hastighet upp till 350 km/h.

I denna rapport undersöks energi- och personalkostnaden för hastigheter upp till 420 km/h för sträckan Lund – Stockholm. Energi- och personalkostnaden har valts som utgångspunkt för att de är kraftigt beroende av val av STH. Kostnaderna jämförs med en potentiell intäkt i syfte att undersöka om hastighetsvalet är korrekt motiverat utifrån nämnda aspekter. Beräkningarna baserades på Siemens Velaro D som utgör referensfordon. För att ge tillräcklig acceleration upp till 420 km/h modifierades effekten över 220 km/h. En acceleration upp till 420 km/h som sedan direkt följs av en retardation får en sammanlagd sträcka av 57 km. Det vill säga att det krävs stora avstånd för att kunna ”utnyttja” de höga hastigheterna som snabba fordon kan generera. Rapporten kom fram till att en hastighetsökning från 320 km/h till 420 km/h har liten påverkan för regional trafik då stationsavstånden varierar mellan 25 km och 120 km. Nämnda hastighetsökning hade enbart resulterat i en tidsvinst av 8 minuter och 55 sekunder mellan Lund och Stockholm. Detta motsvarar 7 % av den totala resetiden. Vid interregional trafik kunde däremot 21 % av resetiden besparas genom en hastighetsökning med minimalt ökande energi- och personalkostnader. Energi- och personalkostnaden utgjorde 2,1 % av intäkterna vid 300 km/h och 2,0 % av intäkterna vid 400 km/h.

Efter att ha genomfört denna hastighetsstudie anser vi att den nya höghastighetsjärnvägen bör designas för en högre hastighet än den som föreslås. Den tekniska livslängden på höghastighetsbanan beräknas till 120 år och hastighetsutvecklingen på järnväg i världen inte visar några tendenser att stanna av. Höghastighetsjärnväg runt om i världen byggs redan idag för 350 km/h och högre hastigheter kommer med mycket stor sannolikhet vara ekonomiskt försvarbart inom 120 år.

Nyckelord: Höghastighetsjärnväg, framtid, Sverige, Rejlers, LTH, Energi, personalkostnad, hastighet, Velaro D.

Abstract

To satisfy the increased demand for transportation in Sweden the new high-speed railroad line is expected to be finished in 2035. The railroad is expected to connect the three major cities Stockholm, Malmö and Gothenburg with a top speed of 350 km/h.

In this report the cost of on-board personnel and energy is investigated on the Lund – Stockholm stretch for speeds up to 420 km/h. The cost of personnel and energy is heavily dependent on the top speed of the line. The costs are then compared to a potential income to see if the choice of speed is financially justified. The calculations are based on the Siemens Velaro D train. For the acceleration to be reasonable for speeds up to 420 km/h the effect of the train had to be modified above 220 km/h. To accelerate to 420 km/h and then halt to a stop the combined distance was 57 km. Hence the result of this report was that an increase in speed from 320 km/h to 420 km/h had very little effect on the regional traffic because of the short distance between the stations. The 100 km/h difference in speed resulted a time difference of 8 minutes and 55 seconds, this represented 7 % of the total travel time. On the other hand the same difference in speed in the case of interregional traffic resulted in a 21 % total travel time cut with a minimal increase of the personnel and energy costs. Energy and personnel costs only represented 2,1 % of the income at 300 km/h and 2,0 % of the income at 400 km/h.

Our opinion is that according to our calculations the new high-speed railroad should be designed for a higher speed. Track is expected to have a technical life of 120 years and the international development of higher speeds on rail shows no evidence of slowing down. High-speed lines are already being built for 350 km/h around the world and higher speeds are with a high probability going to be profitable within 120 years.

Keywords: high-speed rail, future, Sweden, Rejlers, LTH, Energy, personnel cost, speed, Velaro D.

Förord

Detta examensarbete utfördes i samarbete med Rejlers Sverige AB och är den avslutande delen på vår utbildning i Bygg - Järnvägsteknik på Lunds tekniska högskola (LTH) vid Lunds universitet.

Vi vill tacka våra handledare Sven Assarsson (Rejlers) och Ingemar Braathen (LTH) för deras kontinuerliga vägledning och stöd.

Sist men inte minst vill vi tacka Mats Berg på KTH, Pär Helgesson & Anders Ekblom på SJ och Torbjörn Gustavsson på WSP för att de ställde upp på intervjuer samt bidrog med information under arbetes gång.

Maj 2017

Nazer Hamidi & Martin Wiman.

Ordlista

Adhesion:	Energiförhållandet mellan tågets hjul och rälen
DB (Deutsche Bahn):	Tysklands statliga järnvägsbolag
Gångmotstånd:	Bromsande krafter som motsätter sig tågets rörelse
Höghastighetsjärnväg:	En höghastighetsbana är en järnväg som tillåter hastigheter över 250 km/h utan korglutning
Höghastighetståg:	Tåg som har en toppfart över 250 km/h
Interregional trafik:	Direkt tåg mellan Lund och Stockholm (i denna rapport).
Regenerativ bromsning:	När en elektrisk motor används som generator och bromsar tåget genom återmatning av energi till traktionssystemet.
Regional trafik:	Trafik som stannar på samtliga planerade stationer längst med höghastighetsjärnvägen.
Slabtrack:	Helgjutet ballastfritt spår
STH:	Största tillåtna hastighet
Sverigeförhandlingen:	En utsedd grupp som arbetar med finansieringen av den svenska höghastighetsjärnvägen, utökad kollektivtrafik och bostadsbyggande på uppdrag av regeringskansliet.
TSD:	EU:s tekniska specifikationer för driftskompatibilitet
ÅVS:	Åtgärdsvalstudie

Innehållsförteckning

1 Inledning	1
1.1 Syfte	2
1.2 Frågeställning	3
1.3 Avgränsningar	3
1.3.1 Fordon	3
1.3.2 Bana	3
1.3.3 Övrigt	3
2 Bakgrund	4
2.1 Banan	4
2.2 Tågets egenskaper	7
2.2.1 Acceleration & retardations gränser	7
2.2.2 Energi	8
2.3 Kostnader	9
2.3.1 Personal kostnader	9
2.3.2 Inköspriser för el	9
2.3.3 Övriga kostnader	10
2.4 Intäkter	10
3 Metod	11
3.1 Orientering kring frågeställningen	11
3.2 Beräkningsunderlag	11
3.2.1 Val av fordon	11
3.2.2 Stationsavstånd	12
3.2.3 Formler	12
3.2.4 Personalkostnad	12
3.3 Beräkningar	12
3.3.1 Acceleration- & bromssträckor	12
3.3.2 Personalkostnad	13
3.3.3 Energikostnad	13
3.3.4 Intäkter	13
3.3.5 Sammanställning	13
3.4 Reflektion över ingångsdata	13
4 Resultat	14
4.1 Energiförbrukning	14
4.2 Körtider	16
4.2.1 Acceleration & retardation	16
4.2.2 Hastigheter & sträckor	17
4.2.3 Personalkostnad	19
4.3 Jämföra energiförbrukning mot personalkostnad	20
4.4 Intäkter	22

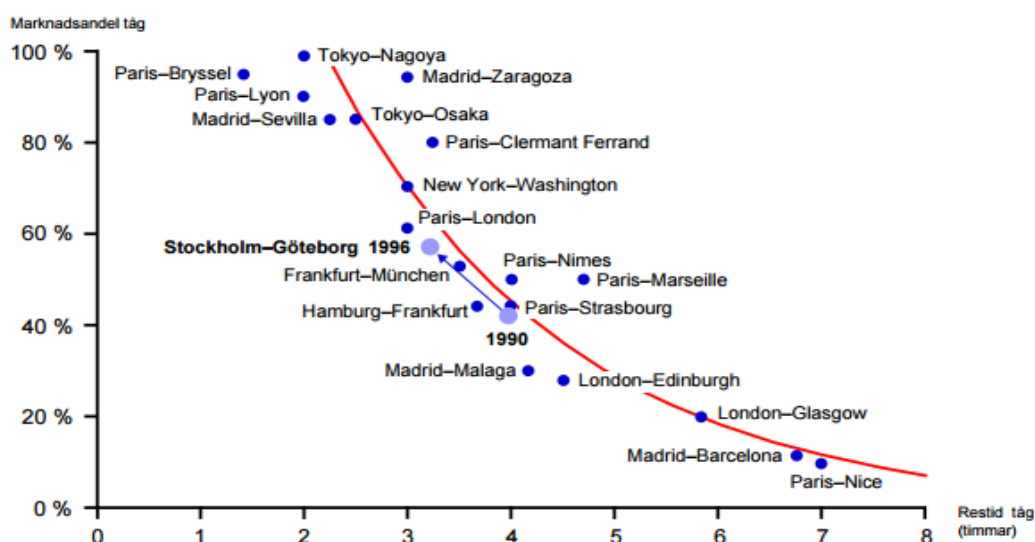
5 Diskussion	24
5.1 Fordon	24
5.1.1 Velaro D.....	24
5.1.2 Övriga fordon	24
5.2 Banan	24
5.3 Kostnader & intäkter	25
5.3.1 Kostnader	25
5.3.2 Intäkter.....	26
5.3.3 Jämförelse	26
6 Slutsatser	28
6.1 Bana	28
6.2 Personalkostnad & energiförbrukning	28
6.3 Trafikering	29
6.4 Felkällor	30
7 Referenser	31
Bilaga 1	33

1 Inledning

Rörlighetsutvecklingen i världen visar inga tecken på att stanna av och resultaten av människans miljöpåverkan blir allt mer tydliga. Det som behövs är för att tillgodose denna rörlighetsutveckling är snabba och effektiva transporter. Transporter som dessutom kan tillgodose behovet för dagens generationer utan att äventyra framtida generationers möjligheter att tillgodose sina behov (Hyden , 2010). Då bilens ineffektivitet är bevisad (Hansson & Grahn, 2013) och klimatfrågans vikt ökar anses tåg som det lämpligaste resealternativet (Fröidh & Nelldal, 2008).

“Ökade hastigheter på vägnätet inte kan förväntas eftersom bränsleförbrukningen är betydligt högre i höga hastigheter”
Per Corshammar, 2012.

Höghastighetsjärnvägen är det enda realistiska transportslaget som klarar av en högre hastighet med låg klimatbelastning. Om den nya svenska höghastighetsjärnvägen byggs för 320 - 350 km/h förväntas den ta marknadsandelar från både väg- och flygtrafiken (Sverigeförhandlingen & PWC, 2015). Med järnvägens låga rullmotstånd och höga elektrifieringsgrad medför detta kraftigt minskade koldioxidutsläpp.



Figur 1: Samband tågrestid och marknadsandel tåg/flyg, figuren visar hur stora marknadsandelar tåg har gentemot flyg beroende på resetiden av tåget (Andersson, et al., 2017).

Figur 1 visar tydligt hur resetider under tre timmar ökar de marknadsandelar som tåg har gentemot flyg. Idag tar sträckan Stockholm – Lund 4 timmar och 21 minuter (SJ, 2017): Resetiden kan minskas till 1 timme och 17 minuter med hjälpa av den nya höghastighetsbanan om direkttåg kör i 420 km/h. På järnväg uppnåddes redan 2007 hastigheter upp till 575 km/h av ett franskt TGV-tåg men kommersiell trafik i denna hastighet finns inte idag (Fröidh & Nelldal, 2008).

”Den tekniska utvecklingen på järnvägen har i mindre steg tagit oss dit vi är idag, vilket är 320 km/h. Om några decennier kan 360 km/h vara en väl fungerande hastighet men vi är inte där än”
Helgesson, 2017.

Efterfrågan på snabbare och effektivare transporter förväntas fortsätta öka (Fröidh & Nelldal, 2008). Tåget är det energieffektivaste och ett av de snabbaste färdssätten, dessutom har tåget den högst utvecklingspotentialen (Fröidh & Nelldal, 2008). På grund av detta har Trafikverkets styrande dokument traditionellt anvisat att man ska bygga järnväg med en framtidsfaktor på hastigheten av 1,3 (Trafikverket, 2014). 320 km/h blir då 416 km/h men detta har inte varit fallet vid höghastighetsbanan utan de nya föreskrifterna som skapats har specifika hastighetsbegränsningar. När banan tas i bruk 2035 (Sverigeförhandlingen & PWC, 2015) finns det en risk att den redan är utdaterad.

I den här rapporten undersöks hur kostnaderna för att bedriva höghastighetstrafik varierar i förhållande till hastigheten. Faktorer såsom energiförbrukning och personalkostnad jämförs mot potentiella intäkter på den utvalda sträckan mellan Lund – Stockholm.

Studiens resultat ska motivera en högre designad hastighet på banan för de förväntade 6,2 miljoner årliga resenärer som förväntas på sträckan tills 2044 (Sverigeförhandlingen & PWC, 2015)

“I princip råder sambandet att ju bättre tillgänglighet, som ökar med högre hastigheter, desto högre inkomster. I takt med att inkomsterna ökar är vi också beredda att betala mer för snabbare resor.” (Fröidh & Nelldal, 2008).

1.1 Syfte

Syftet med denna teoretiska studie är att sammanställa och jämföra hur kostnaderna av energi och personal varierar i förhållande till hastigheten. Kostnaderna som beräknas ska sedan jämföras med en potentiell intäkt för att ge en grov uppskattning om lönsamheten med att tillåta en högre hastighet.

Rapporten baseras i stor utsträckning på information från den pågående Sverigeförhandlingen, SJ's personalkostnader samt elkraft från Trafikverkets nät. Målet är ett resultat som ska vara tillämpningsbart som diskussionsunderlag vid val av fordon och utformning av den planerade höghastighetsjärnvägen. Förhoppningen är att motivera en högre hastighet för att framtidssäkra höghastighetsbanan och öka andelen resenärer som väljer järnväg framför andra transportslag.

1.2 Frågeställning

I denna studie undersöks hur personal- och energikostnaden varierar på grund av hastighet specifikt för sträckan Stockholm - Lund.

- Studien undersöker i fall energi och personalkostnad har någon avsevärd vikt mot den potentiella inkomsten med att köra snabbare?
- Studien undersöker även vilken hastighet är lämpligast vid olika stationsavstånd utifrån energi- och personalkostnad?
- Dessutom undersöker studien vad operatörer och experter anser om valet att bygga höghastighetsbanan med en topphastighet av 320-350 km/h?

Både regional trafik som stannar på samtliga stationer samt interregional trafik som går direkt från Stockholm till Lund kommer att undersökas. Om tekniken utvecklas och tillåter hastigheter upp till 420 km/h undersöks även om det är lönsamt att köra så fort.

Vår hypotes är att med ökad hastighet tillkommer en högre energiförbrukning och därigenom en högre kostnad samtidigt som personalkostnader minskar med tidsvinsten. Där summan av dessa två är lägst bör den billigaste hastigheten vara.

1.3 Avgränsningar

1.3.1 Fordon

För att få en begränsad mängd data kommer huvuddelen av beräkningarna att baseras på ett exempeltåg. Kostnader såsom slitage, service och upphandling av fordon kommer inte att finnas med i kalkylen. Tågets adhesion antas vara tillräcklig för att tillåta drift acceleration samt retardation.

1.3.2 Bana

Stationsavstånden uppskattas enligt uppgifter från Sverigeförhandlingen och det förutsätts att järnvägen mellan stationerna tillåter högre hastigheter än 420 km/h. Kurv- och lutningsmotstånd kommer att estimeras. Byggnations- och underhållskostnaden av banan kommer inte att ingå i rapporten.

1.3.3 Övrigt

Den trafik som banan förväntas trafikeras av kommer troligtvis inte bestå av enbart interregional trafik som kör ändpunkt till ändpunkt och en regional trafik som stannar på samtliga stationer. I studien har det valts att studera de två tidigare nämnda scenarierna för att skapa kontrast och alla möjliga trafikeringmöjligheter däremellan beräknas inte.

Rapporten kommer till stor del baseras på data från operatörernas synvinkel. Elpriserna kommer att baseras på kostnaden av el som publicerats av Trafikverket för en tidigare period.

2 Bakgrund

Det svenska järnvägsnätet är hårt utnyttjat och överbelastat på många sträckor. Ett hårt utnyttjande i kombination med hög efterfråga på resor och godstransporter leder till att efterfrågan är större än kapaciteten (Lindfeldt, 2014). För kunna möta denna tillväxt behövs ny infrastruktur (Gustavsson, 2017). Höghastighetsjärnvägen ska medföra ökning av kapaciteten på det svenska järnvägsnätet genom att avlasta det befintliga järnvägsnätet. Den planerade höghastighetsjärnvägen beräknas vara klar för bruk 2035 och binda samman Stockholm med Göteborg och Malmö med en hastighet av 320 - 350 km/h. En satsning på höghastighetsjärnvägen uppfyller de transportpolitiska målen på ett sätt som inga andra transportmedel gör. Höghastighetsjärnvägen bidrar till bättre tillgänglighet, kortare och effektivare restider mellan huvudområdena i landet och skapar även en stärkt förbindelse till Europa. De minskade resetiderna kommer även förstärka järnvägens konkurrenskraft och stimulerar bostadsmarknaden i de delar av landet som berörs (Järnvägsgruppen, 2016).

2.1 Banan

Stationsavstånd är en avgörande faktor när det kommer till punkter som kapacitet och banans STH. Jämna stationsavstånd ökar kapaciteten vid blandad trafik då det ger bättre möjligheter för möten och omkörningar (Linfeldt, 2013). En högre hastighet tillåter fler tågpassager per tidsenhet så att kapaciteten gynnas (Nelldal, et al., 2009). Då maxhastigheten på höghastighetsjärnvägar är avsevärt högre än på konventionell järnväg blir även accelerations- och bromssträckeran längre vilket leder till att kapaciteten gynnas mer av långa stationsavstånd.

Stationsavstånden för sträckan Stockholm - Lund på den planerade svenska höghastighetsbanan varierar från 25 km upp till 120 km.

Tabell 1: Stationsavstånd Lund – Stockholm (Trafikverket, 2016).

Järna-Vagnhärad	25 km
Vagnhärad-Nyköping	30 km
Nyköping-Norrköping	65 km
Norrköping-Linköping	25 km
Linköping- Tranås	60 km
Tranås-Jönköping	60 km
Jönköping-Värnamo	60 km
Värnamo-Hässleholm	120 km
Hässleholm-Lund	60 km

Pär Helgesson på SJ menar att 120 km är ett lämpligt stationsavstånd för att köra i 320 km/h. Tanken är att en del tåg inte ska stanna i alla stationer (Sverigeförhandlingen & PWC, 2015), på så sätt kan maxhastigheten utnyttjas effektivare. I de fall då flera, på varandra följande, tåg har samma rörelsemönster kommer en lägre hastighet att erhållas. Lägre hastigheter medför en kapacitetshämmande effekt för, framförallt, de snabbare tågen (Helgesson, 2017). Jämnare stationsavstånd ger också möjlighet till smidigare omkörningar som i sin tur kan höja kapaciteten på banan (-Lindfeldt, 2009). Det mest optimala är att höghastighetsjärnvägen trafikeras av ren höghastighetstrafik. Detta är denna lösning som har haft störst framgång internationella fall (Sverigeförhandlingen & PWC, 2015).

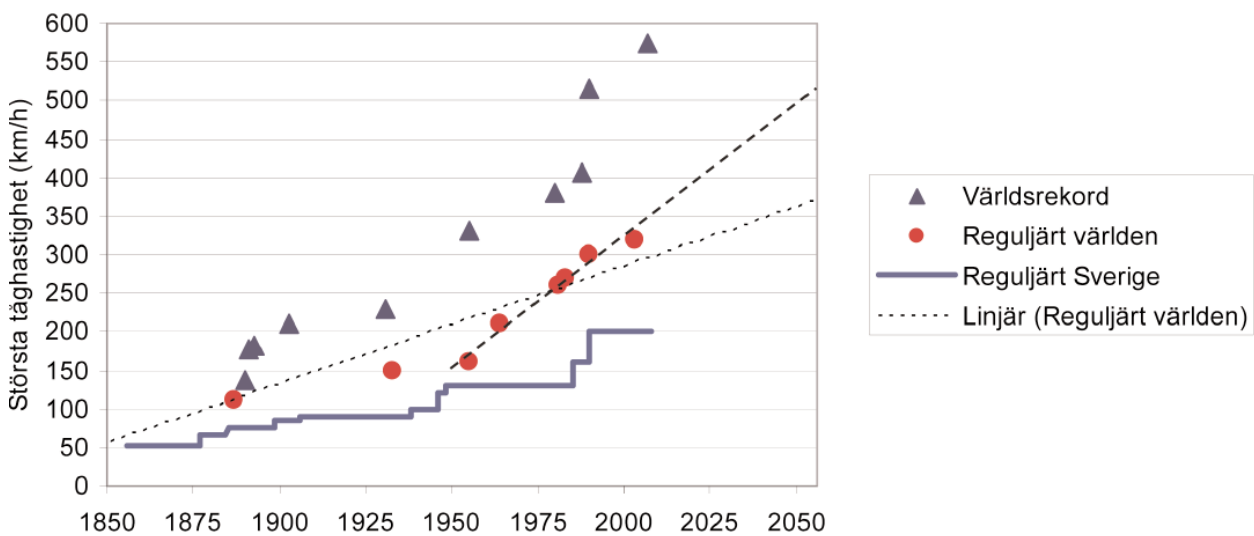
Vid nybyggnation av banor i Sverige har Trafikverket tidigare planerat för en framtidsfaktor av 1,3 vid val av rälsförhöjning (Trafikverket, 2014), vilket i Sverigeförhandlingens fall hade inneburit en STH av $320 \cdot 1,30 = 416$ km/h. Men i Systemstandarden för höghastighetsbanor som skrevs 2014 slopades denna regel och de skrev standarden med en specifik maxhastighet på 320 km/h. T.ex:

“Permanenta geokonstruktioner i underbyggnad och undergrund ska dimensioneras för tåghastighet 320 km/h. Vid dimensionering av geokonstruktioner ska det inte vara någon framtidssäkring för högre framtida tåghastigheter.” Trafikverket, 2014.

TDOK:et ersattes 2016 med “Teknisk systemstandard för höghastighetsbanor, krav, version 2.1”. I det nya dokumentet definierade Trafikverket inte om man fick bygga med en “framtidssäkring för högre framtida tåghastigheter”. Alla kraven i dokumentet är dock för hastigheter upp till 320 km/h. Projekterande konsulter har därför dimensionerat vissa delar av banan för max 320 km/h för att spara pengar.

“Ostlänken går det knappt att köra 320 med max rälsförhöjningsbrist.” “Men vissa sträckor projekteras för att klara 400 km/h, det är bara kontaktledningen som ska hänga med” Gustavsson, 2017

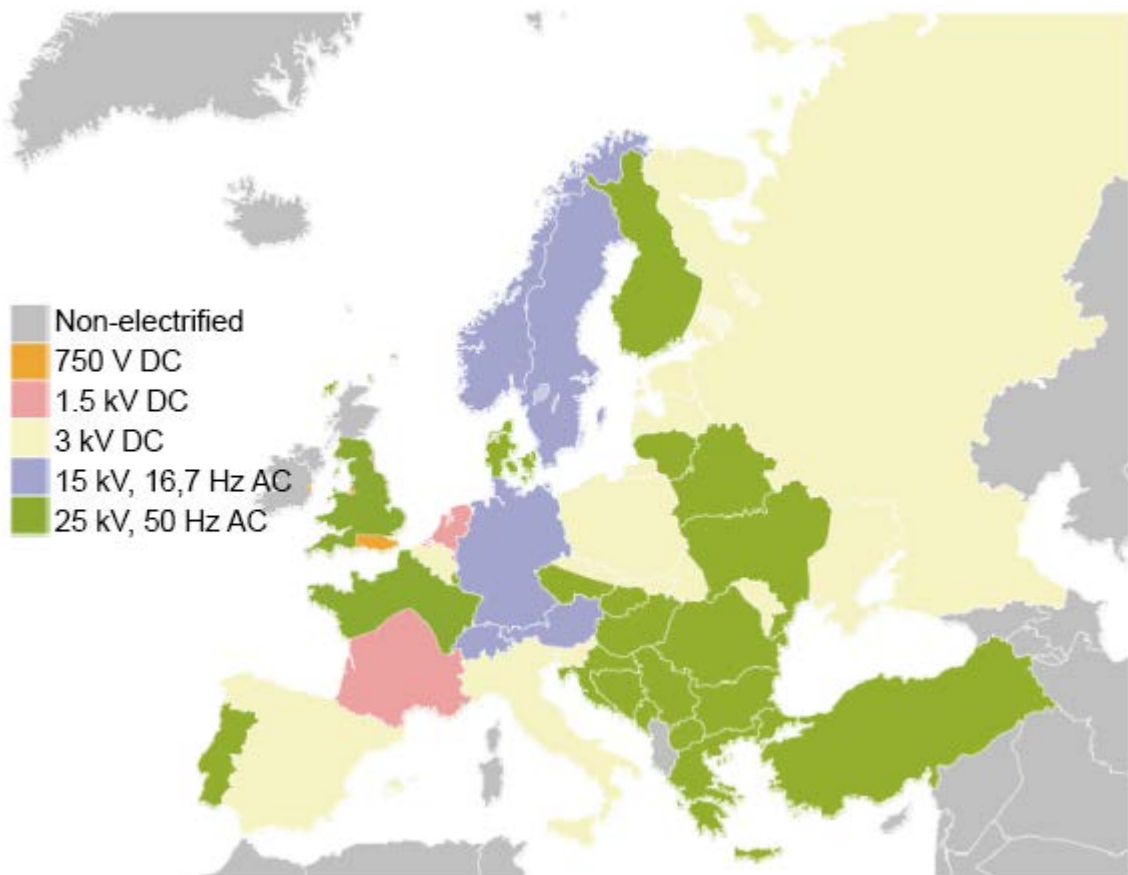
Detta innebär att en framtida hastighetsökning med stor sannolikhet innebär en kostsam ombyggnation av banan (Andersson, et al., 2016). Behovet av högre hastigheter och punktlighet på järnvägen är stort om attraktiviteten med järnväg ska ökas- I dagsläget är tågets konkurrenskraft dock relativt liten. Ett tydligt exempel är sträckan är Stockholm- Göteborg som på grund av den långa restiden och låga punktligheten väljs bort av 65 % av resenärerna på grund av andra färdmedel än tåg (Sverigeförhandlingen & PWC, 2015). Om en jämförelse utförs mellan hastigheten på järnvägen i Sverige och omvärlden syns det tydligt att Sverige har hamnat efter, åtminstone när det gäller hastighet och punktlighet.



Figur 2: Hastighetsutveckling i världen och i Sverige (Fröidh & Nelldal, 2008).

2.2 Tågets egenskaper

Det finns idag järnvägsfordon som klarar av 500 km/h men det finns inga som används för kommersiellt bruk över 400 km/h. Beräkningarna i denna studie har baserats på ett tåg som används kommersiellt idag. För att klara hastigheter upp till 420 km/h har tågets effekt modifierats för att tillåta en tillräcklig acceleration över 220 km/h. Siemens Velaro D, baserat på ICE 3 för internationell trafik med utgångspunkt från Tyskland, verkar som ett rimligt alternativ för den svenska järnvägen. Tågsättet byggdes för det tyska (och svenska) traktionssystemet 15 kV AC. Dock kan tåget även köras på det danska 25 kV nätet samt 1,5/3 kV DC som kan bli aktuellt om det svenska höghastighetsnätet skall förbindas med Centraleuropas (Siemens AG 2016, 2017).



Figur 3:Karta över Europas traktionssystem (Frey, 2012)

2.2.1 Acceleration & retardations gränser

I studien ”Det gröna tåget” valdes maxgränsen vid acceleration till $0.6 \frac{m}{s^2}$.

Järnvägsgruppen vid KTH kom fram till att en ökning till $0.8 \frac{m}{s^2}$ hade sparat upp till en minut per stopp och att den högre accelerationen hade varit rimlig utifall det var fler stopp (14 stycken) på sträckan (Andersson, 2012).

För att möjliggöra drift upp till 420 km/h har det antagits att vid hastigheter över 220 km/h kan tåget accelerera med konstant acceleration. Från 220 – 320

km/h användes accelerationen $0.2 \frac{m}{s^2}$ och från 330 – 420 km/h användes accelerationen $0.1 \frac{m}{s^2}$ (Berg, 2017). Detta innebär att vid drift över 220 km/h överskrids motorns maximala effekt. Mellan 90 – 210 km/h beräknas accelerationen enligt formel 1:

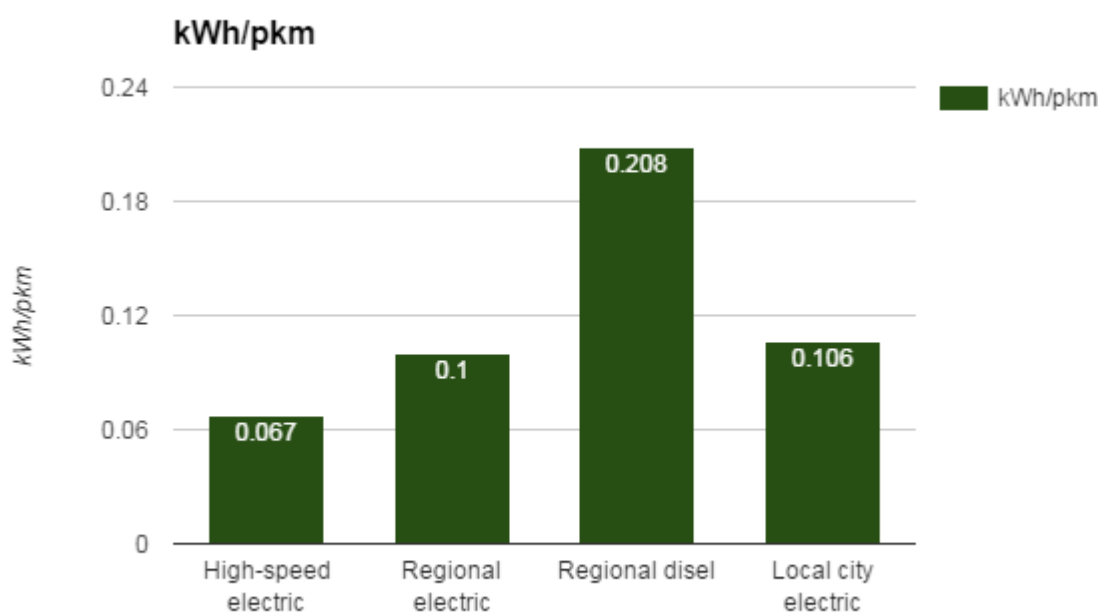
$$\bar{a}_i = \frac{\bar{F}_i - \bar{D}_i}{M_{eT}} \quad [1]$$

Vid ordinarie drift används inte all retardation utan begränsas för att uppfylla komfortkrav. I studien antas att en rimlig retardation vid driftbromsning är $0.6 \frac{m}{s^2}$ vilket dock enbart kan uppnås med elbromsen¹ om motorn har tillräckligt hög effekt (Berg, 2017). I fall det Japanska N700 valts istället för Velaro D så hade dess låga massa och höga motoreffekt medfört en högre acceleration och retardation.

2.2.2 Energi

Energianvändningen i infrastrukturen är en faktor vars vikt har ökat de senaste åren i transportpolitiken. På grund av lågt rullmotstånd och elektriska traktionssystem har järnvägen länge förespråkats vid långväga transporter. En förbränningsmotor har en effektivitet på 20-30% (Hansson & Grahn, 2013) medan en elektrisk asynkronmotor en effektivitet på 91 till 94 % (Andersson, 2012). Dessutom är den elkraft som används på svenska järnvägen till stor del från förnybara energikällor. Till exempel var elkraften som användes på det svenska järnvägsnätet från 100 % förnyelsebara källor år 2015 (Trafikverket, 2016). Elektrisk järnväg är alltså ett transportslag som gynnas från flera håll av de transportpolitiska målen (Regeringskansliet, 2016).

¹ Regenerativ bromsning



Figur 4: Energianvändningen olika tågtyper (Andersson, et al., 2017).

Velaro D tåget är utrustat med regenerativa bromssystem som kan återmata cirka 10 % av energiförbrukningen via traktionssystemet (Siemens AG, 2017b). Ett påslag av 20 % av rullmotståndet anser Mats Berg, KTH, vara rimligt för att approximera lutnings- och kurvmotståndet.

2.3 Kostnader

2.3.1 Personal kostnader

Personalkostnaden är strikt bunden till de antal timmar som personalen jobbar. Dessa timmar påverkas till stor del av körtiden (WSP Analys & Strategi, KTH Järnvägsgruppen, 2008). En kortare körtid innebär att antal fler resor per arbetspass ökar och detta medför en effektivare användning av personalen. En ökad hastighet ger alltså lägre personalkostnader. Det finns även en rad andra faktorer som påverkar arbetstimmarna såsom uppehållstider, väntan på körtillstånd och tågvändning. Då denna studie är bunden till hastigheten kan dessa kostnader räknas som konstanta och anses vara irrelevanta.

I det fall SJ hade kört med ett dubbelkopplat Siemens Velaro D så hade de använt två tågvårdar i varje vagnset och en lokförare resulterade i totalt fem anställda. En tågvård kostar SJ 206,25 kr/h och en lokförare 284,40 kr/h. Personalkostnader per tåg och timme uppnår alltså 1 109,40 kr/h (Ekblom, 2017).

2.3.2 Inköpspriser for el

Samtliga priser är baserade på elpriserna för januari 2017 (Trafikverket, 2017)

Elpriset för den fordonstypen som studiens beräkningar har baserats på blir enligt Trafikverket 50,1722 öre/kWh (formel 2).

$$(F * (E_p + N) + E_c) * \text{Mätarställning} = \text{Elkostnad} \quad [2]$$

Förlustpåslag: 1,14 (F)

Elpris: 34,18 öre/kWh (E_p)

Nätkostnad: 8,05 öre/kWh (N)

Elcertifikat: 2,03 öre/kWh (E_c)

Mätarställning: Den ström som fordonet tar emot (kWh)

2.3.3 Övriga kostnader

Kostnaden av energianvändningen kommer baseras på den energi tåget använder på körsträckorna, diverse förlustfaktorer och elpriserna i januari från Trafikverkets elprisrapport 2017.

För den framtida höghastighetsjärnvägen har PCW tagit fram kommersiella förutsättningar för höghastighetståg i Sverige där de har räknat med en framtida banavgift på 32 kronor per tågkilometer.

2.4 Intäkter

Järnväg är en samhällsinvestering som möjliggör en fortsatt utveckling i landet (Järnvägsgruppen, 2016). När både befolkningen och ekonomin växer ökar behovet av resor också. Därför måste infrastrukturen utvecklas för att matcha behovet (Gustavsson, 2017).

Höghastighetsjärnväg innebär högre kostnader men samtidigt innebär också högre intäkter. De högre intäkterna kan ha olika härkomst. Bland annat högre betalningsvilja hos kunderna på grund av tidsvinsten. En högre hastighet kommer även locka till sig fler resenärer från bil och flyg samt genererar helt nya resenärer (Nelldal, 2008b). Enligt KTH's prognoser kommer höghastighetsjärnvägen skapa helt andra möjligheter och friheter för bosättning och jobb. En person kommer inte att behöva bo i Stockholm för att jobba där (Helgesson, 2017). Pär Helgesson menar också att SJ inte delar Sverigeförhandlingens målbild av intäkter eftersom de inte tar hänsyn till utrikesresor och ökad efterfråga på resor på grund av den högre hastigheten.

3 Metod

Detta arbete baseras på information som samlats från intervjuer med forskare och företagsrepresentanter, rapporter, tidigare examensarbeten samt böcker. När grundläggande information samlats såsom stationsavstånd och fordon parametrar fastställdes genomfördes beräkningar på energi- och personalkostnader. Beräkningarna baserades till stor del på formler från böckerna som användes som kurslitteratur Samverkan fordon/- bana (Andersson, et al., 2017), (Andersson, et al., 2017) och Velaro D's egenskaper från Siemens hemsida (Siemens AG, 2017b). Beräkningsresultatet jämförs sedan med branschrepresentanternas åsikter från intervjuerna. Slutligen sammanställs informationen med stöd av intervjuer och rapporter.

3.1 Orientering kring frågeställningen

Första steget i arbetet var att orientera sig kring frågeställningen för att se hur den förhåller sig till verkligheten samt hur den kan besvaras. Genom att studera om höghastighetsjärnväg på en bred bas anskaffades en förståelse kring höghastighetskonceptet som helhet. Ett problem som uppstod i denna fas var att vid användning av sökmotorer så kom mycket presentationer och nyhetsartiklar upp. Majoriteten av källorna innehöll väldigt lite fysikaliska egenskaper av fordon- bana och var väldigt anpassade för majoriteten av befolkningen. I denna fas genomförde vi en intervju med Torbjörn Gustavsson, WSP, där han fick prata relativt fritt om WSP's arbete med ÅVS² Jönköping – Lund, höghastighetsjärnväg och Sverigeförhandlingen.

3.2 Beräkningsunderlag

För att få ett resultat som är tillämpningsbart på den nya höghastighetsbanan behövdes beräkningsunderlag som reflekterar ett möjligt utfall. Val av fel beräkningsunderlag kunde resultera i att resultatet är helt oanvändbart. Mats Berg, KTH, bidrog mycket i denna fas då han kontrollerade både beräkningar och fordonsmodifikationer.

3.2.1 Val av fordon

För att beräkna körtider och energikostnad behövdes ett representativt beräkningsunderlag. Kanske den viktigaste faktorn i detta underlag var val av fordon. Kommersiell trafik på järnväg i 420 km/h finns inte i dagens läge så det bestämdes att gå vidare med ett fordon som används aktivt i världen nu.

Kraven var modernt tåg som lämpar sig för det svenska järnvägssystemet och kan klassas som ett höghastighetståg. Modifikationer gjordes sedan inom teoretiskt rimliga gränser för att klara av kommersiell drift i 420 km/h.

² Åtgärdsvalstudien

3.2.2 Stationsavstånd

Den svenska höghastighetsjärnvägen projekteras för fullt och stationerna är ännu inte helt fixerade på kartan. Sverigeförhandlingens ÅVS: er har däremot lagt fram korridorerna där banan kommer ligga. I ÅVS: erna framgår även det även vilka städer som kommer få stationer tilldelade. Utifrån ÅVS: erna (Trafikverket, 2016) och mailkontakt med Trafikverket (Johansson, 2017) approximerades stationsavstånden med hjälp av kartprogrammet Eniro (Eniro, 2017)

3.2.3 Formler

För att kunna utföra de lite mer avancerade beräkningarna användes kurslitteratur från Bygg- och järnvägsteknik programmet på LTH. I litteraturen från kursen samverkan fordon bana fanns de flesta formler som behövdes för att räkna på gångmotstånd, acceleration- och bromssträcka. I boken “Det gröna tåget” från KTH fanns det mycket beräkningar på energianvändning och motivering kring detta. Boken har i kombination med intervjuer använts för att bestämma de “rimliga gränser” inom vilka fordonet kunde modifieras, samt maxgränsen för acceleration och retardation.

3.2.4 Personalkostnad

Genom kontakt med Anders Eklom, chef på SJ, kunde en uppskattning om vilken bemanning en operatör hade kört Velaro D med. Anders gav även en uppskattning om vad en lokförare samt tågvärd kostade operatören per timme.

3.3 Beräkningar

Samtliga beräkningar genomfördes i ett excelark där beräkningarna kunde extrapoleras för de hastigheter och delsträckor som skulle undersökas. Målet med beräkningsarket är att undersöka hur energi- och personalkostnad varierar i olika hastigheter och på olika sträckor längst Lund – Stockholm dragningen.

3.3.1 Acceleration- & bromssträckor

För att komma fram till accelerationen krävdes ekvivalent massa och gångmotstånd samt tågets effekt (Siemens AG, 2017b). Accelerationen beräknades sedan enligt formel 2.

$$\bar{a}_i = \frac{\bar{F}_i - \bar{D}_i}{M_{eT}} \quad [2]$$

Gångmotståndet baseras på det mekaniska- och luftmotståndet, 20 % av det mekaniska motståndet adderades även för att representera kurv- och lutningsmotstånd (Berg, 2017). Accelerationen begränsas vid lägre hastigheter till $0.6 \frac{m}{s^2}$, mellan 90 – 210 km/h till $0.2 \frac{m}{s^2}$ och mellan 330 – 420 km/h till $0.1 \frac{m}{s^2}$. Retardationen antas vara konstant $0.6 \frac{m}{s^2}$ (Se bilaga 1).

Med accelerationen och retardationen kunde de sträckorna beräknas och subtraheras från den totala körsträckan för att få ut körtiden med konstant hastighet. Summan av accelerationstid, retardationstid och tiden som sträckan körs med konstant hastighet blir då den totala körtiden för en sträcka.

3.3.2 Personalkostnad

Körtiderna multiplicerades med SJ's kostnader för ombordspersonal för att få ut personalkostnaden. Enligt Anders Ekblom, chef på SJ, hade de haft två tågvärdar för varje tågsätt samt en lokförare per tåg vilket resulterar i totalt fyra tågvärdar och en lokförare per tåg á:

- Tågvärd: 206,25 kr/h
- Lokförare: 284,4 kr/h

3.3.3 Energikostnad

Under accelerationstiden så levererar motorn en dragkraft av 683,77kN fram till hastigheten är 80 km/h, efter det begränsas dragkraften av effekten (16kW) genom hastigheten enligt formel 3:

$$F = \frac{P}{v} \quad [3]$$

Multipliceras sedan effekten med accelerationstiden erhålls energiförbrukningen i kWh. Vid konstant hastighet blir energianvändningen gångmotståndet multiplicerat med hastigheten.

Under retardationen levererar motorn en negativ dragkraft och återmatar³ den genererade effekten till traktionssystemet. Den återmatade effekten subtraheras från den totala energianvändningen och kan estimeras att bespara ca 10 % av den totala energianvändningen (Siemens AG 2016, 2017).

Tåget använder i allmänhet asynkronmotorer med en verkningsgrad på 91-94% multiplicerades en förlustkonstant av 8,7 % till energiförbrukningen (1/0,92). Den totala energianvändningen för en sträcka multipliceras sedan med Trafikverkets elpriser för att få ut energikostnad.

3.3.4 Intäkter

En grov beräkning på intäkter per tågresa gjordes där tåget antogs köra med 60 % kapacitet och ett biljettpreis på 300 kronor.

3.3.5 Sammanställning

Intäkterna och kostnaderna sammanställdes över olika hastigheter både per timme och per tågakilometer. Banavgiften lades även till i vissa figurer där utgifter jämfördes med inkomster för att ge en känsla av proportion.

3.4 Reflektion över ingångsdata

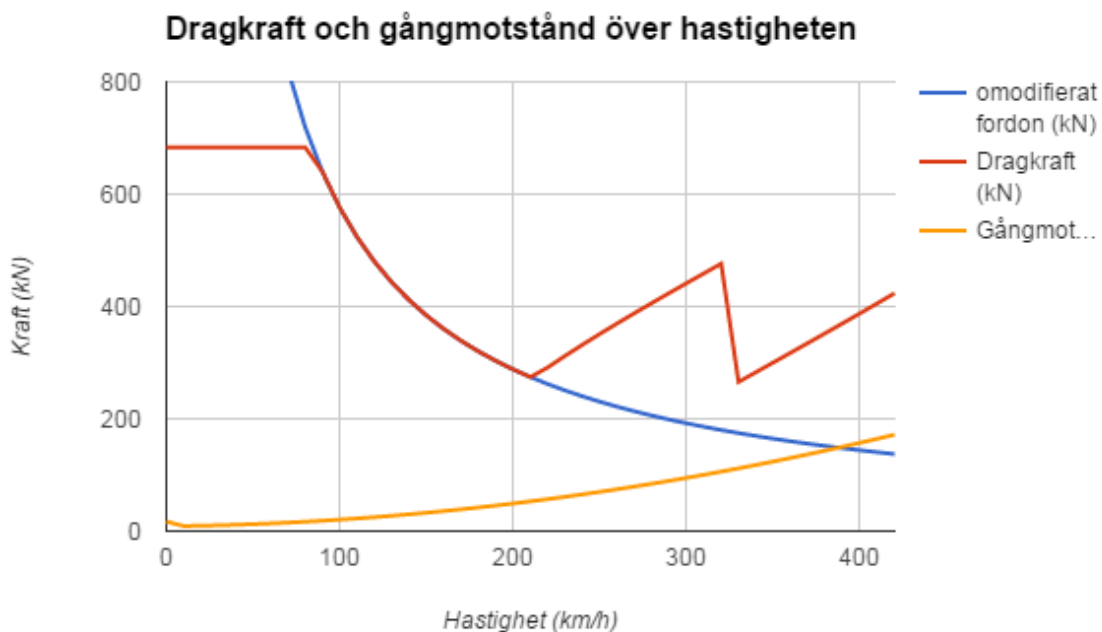
Då ingångsdata sammanställts jämförs resultatet med frågeställning och hypotes. Resultatet diskuteras mot intervjuer och övrig insamlad information.

³ Regenerativ bromsning

4 Resultat

4.1 Energiförbrukning

Under accelerationssträckan så är energiförbrukningen per tidsenhet avsevärt större än då hastigheten ska hållas konstant. En större andel av motorns maximala effekt används vid acceleration (ofta 100 %) medan vid konstant hastighet måste enbart gångmotståndet överkommas. I normala fall innebär en högre hastighet att en mindre dragkraft finns att ta ut från motorn och en andelen kraft som används för att överkomma gångmotståndet ökar.



Figur 5: Dragkraft och gångmotstånd över hastighet. Vid 220 km/h blir accelerationen konstant $0.2 \frac{m}{s^2}$ och vid 330 km/h blir den $0.1 \frac{m}{s^2}$, som resultat av detta blir dragkraftens kurva linjär i figuren.

Med det modifierade fordonet ökar energiförbrukningen vid acceleration kraftigt efter 220 km/h på grund av att motorns effekt överskrids (se figur 5) för att ge en godtagbar acceleration. Vid högre hastigheter krävs längre accelerationssträckor. Motorn arbetar då på sin maximala effekt under en längre tid. Gångmotståndet också ökar med hastigheten. Summan av energianvändningen för acceleration och att bibehålla en hastighet för en sträcka blir då en andragradsekvation (se figur 6).



Figur 6: Energikostnad över hastighet vid interregional trafik (505 km)

Vid en hastighetsökning av 100 km/h från 320 km/h till 420 km/h ökar energianvändningen på sträckan 505 km (interregional trafik) med 62,6 %.



Figur 7: Energikostnad över hastighet på en 120 km sträcka

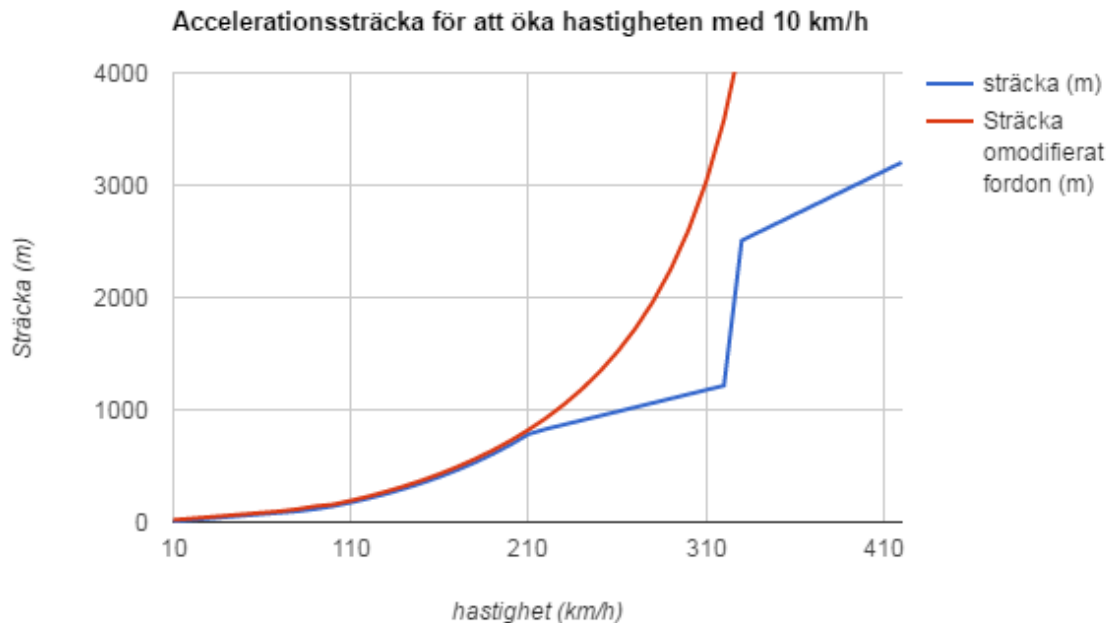
Energianvändningen på sträckan 120 km ökar med 63,6 % om man höjer hastigheten från 320 km/h till 420 km/h. I det fall en energijämförelse utförs för sträckorna 120 km (figur 7) och 505 km (figur 6) är det möjligt att se en aningen brantare utveckling på 120 km sträckan. Beräknas energikostnaden av att köra sträckorna i 420 km/h så kostar energin 31 kr/km på 120 km sträckan

och 25 kr/km på 505 km sträckan. Skillnaden uppstår på grund av att en större andel av körtiden består av acceleration på den kortare sträckan.

4.2 Körtider

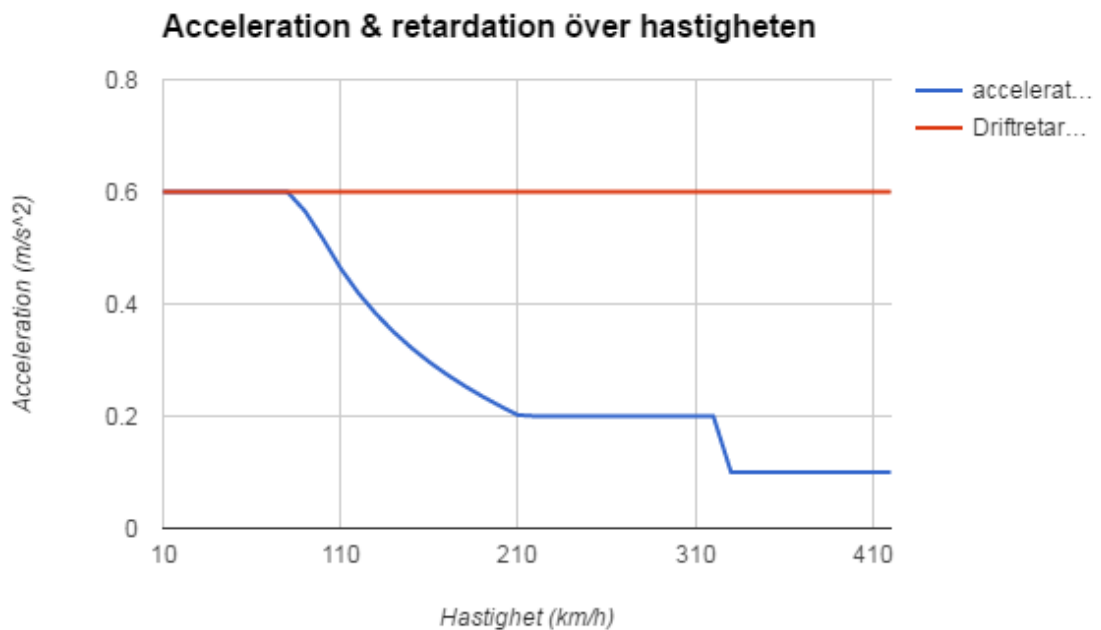
4.2.1 Acceleration & retardation

Som tidigare nämnts har accelerationstiden stor inverkan på energikostnaden. Både accelerationen och retardationen har en inverkan på körtiden. En låg acceleration minskar sträckan som körs med topphastighet.



Figur 8: Accelerationssträcka för att öka hastigheten med 10 km/h

I figur 8 syns tydligt att accelerationssträckan hade blivit oändligt lång om det inte vore för modifikationen av konstant acceleration. Om retardationssträckan funnits med i figur 8 hade den efterliknat accelerationen mellan 0 – 80 km/h. Retardationen hade sedan fortsatt linjärt över alla hastigheter då den är konstant $0.6 \frac{m}{s^2}$ vid driftbroms (se figur 9).

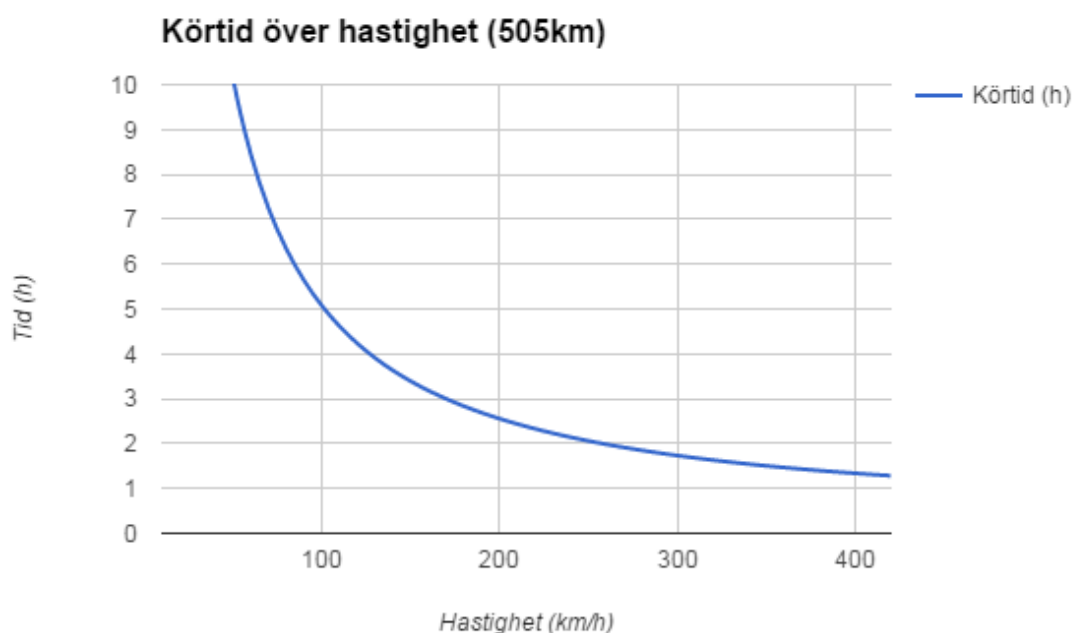


Figur 9: Acceleration och retardation över hastighet

I figur 9 syns accelerationens övre- ($0.6 \frac{m}{s^2}$) och undre gränser ($0.2 \frac{m}{s^2}$, $0.1 \frac{m}{s^2}$). Med acceleration och retardation enligt figur 9 blir den kortaste sträckan för att nå 420 km/h och stanna igen 57 km.

4.2.2 Hastigheter & sträckor

En hastighetsökning från 320 km/h till 420 km/h innebär en tidsbesparing på 20 minuter och 52 sekunder för direkttågen. Tidsbesparingen motsvarar 21 % av resan mellan Lund och Stockholm vilket kan vara en avgörande faktor vid val av transportslag. Resetiden och turtätheten påverkas positivt av tidsbesparingen vilket innebär en högre attraktivitet (Hyden , 2010).



Figur 10: Körtid över hastighet (505 km)

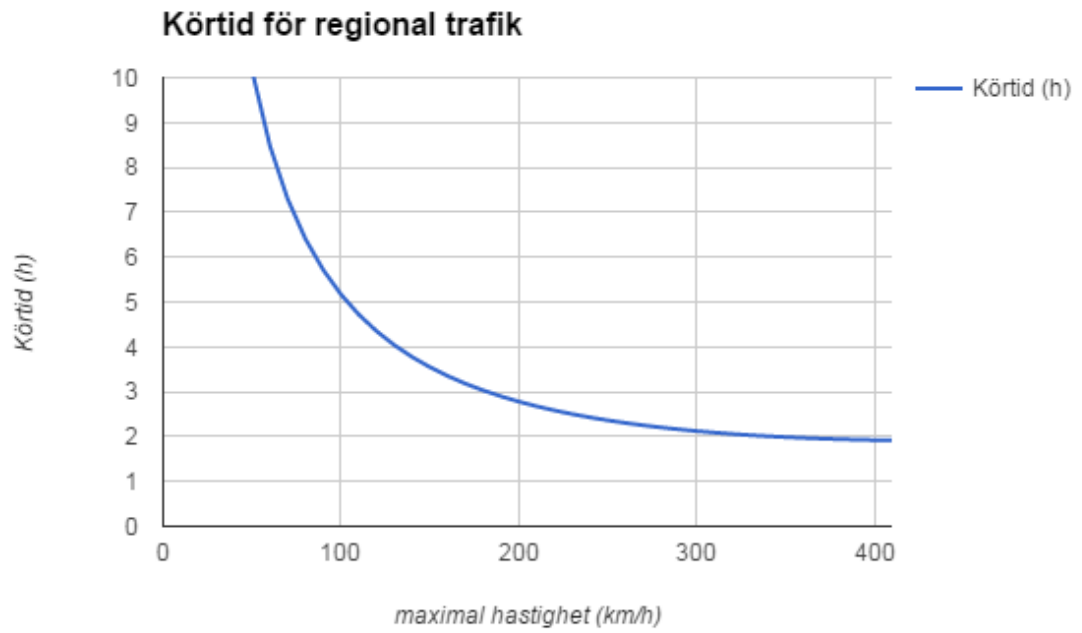
Om stationsavståndet är 25 km är det enbart möjligt att accelerera upp till 320 km/h. Körs sträckan i 220 km/h jämfört med 320 km/h så skiljer körtiden med 51 sekunder vilket motsvarar 10 % av restiden mellan destinationerna.

I de fall Stockholm – Lund körs med regional trafik som stannar på samtliga stationer kommer den maximala hastigheten på vissa sträckor vara enligt följande:

Tabell 2: Hastighet över avstånd

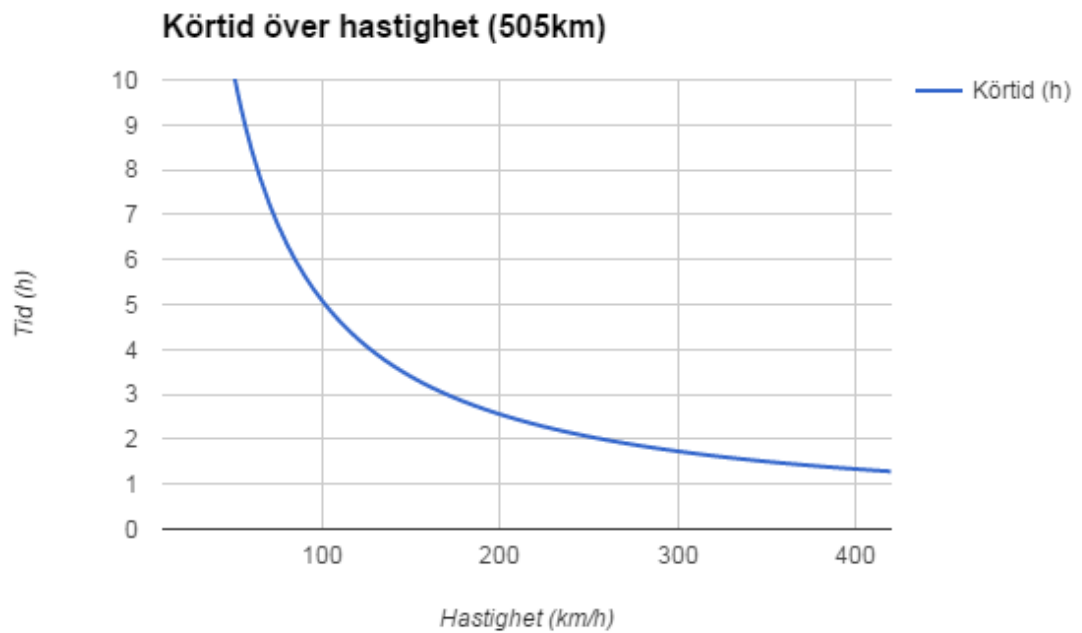
Sträcka:	25 km	30 km	60 km	65 km	120 km
Maximal hastighet:	320 km/h	340 km/h	+420 km/h	+420 km/h	+420 km/h

De maximala hastigheterna på delsträckorna begränsar tidsvinsten med att höja hastigheten för den regionala trafiken. En höjning av STH från 320 km/h till 420 km/h resulterar i en tidsbesparing av 8 minuter och 55 sekunder. Det motsvarar 7 % av den totala resetiden mellan Lund och Stockholm.



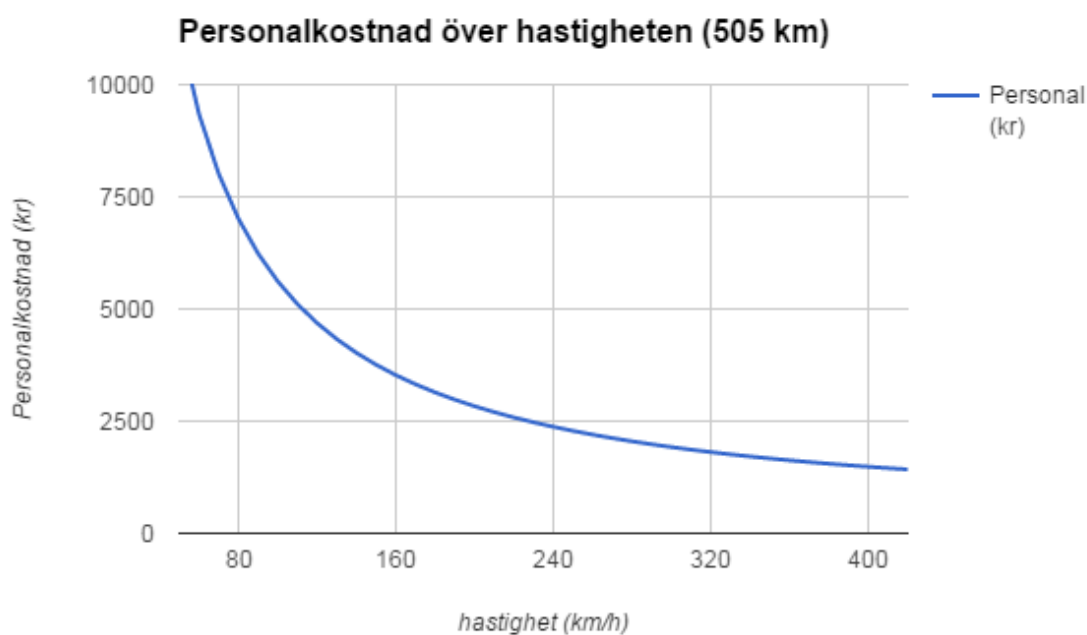
Figur 11: Körtid för regional trafik

4.2.3 Personalkostnad



Figur 12: Körtid över hastighet för interregional trafik (505 km)

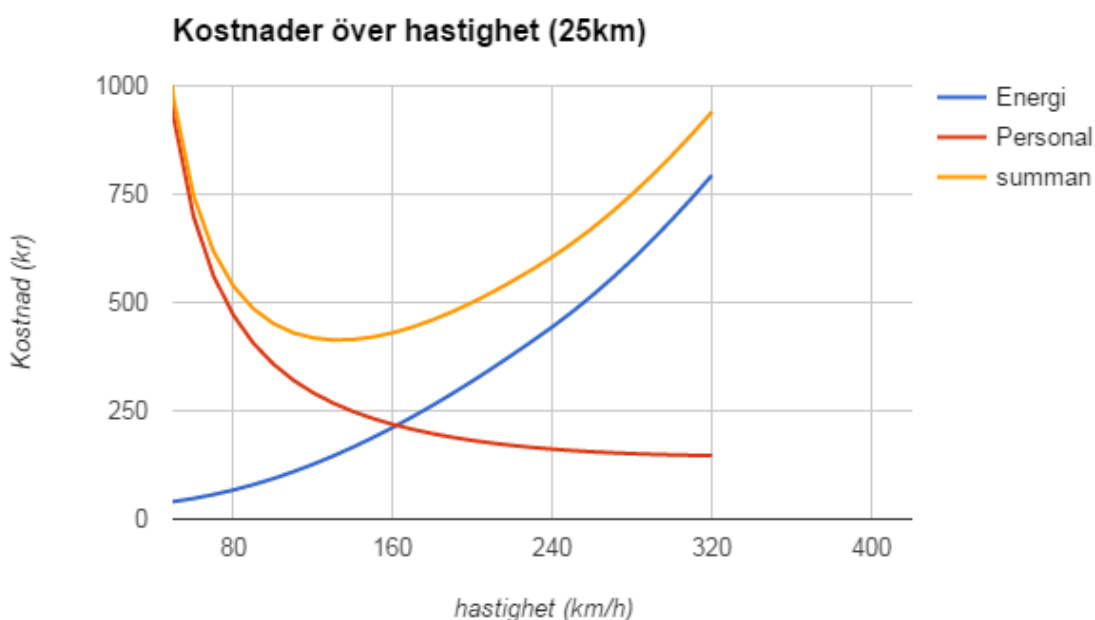
Den tydliga korrelationen mellan körtid (figur 12) och personalkostnad (figur 13) beror på den fixerade personalkostnaden per timme.



Figur 13: Personalkostnad över hastighet (505 km)

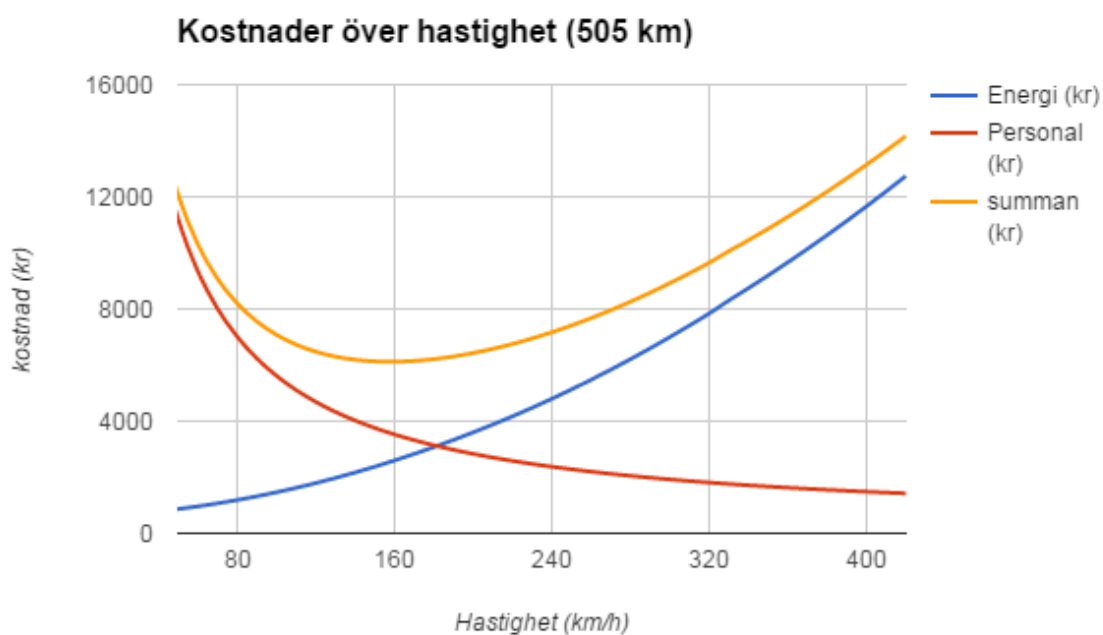
4.3 Jämföra energiförbrukning mot personalkostnad

Med en exponentiellt minskande personalkostnad och en exponentiellt ökande energikostnad förväntas ett optimalt värde att finnas någonstans på hastighetsskalan.

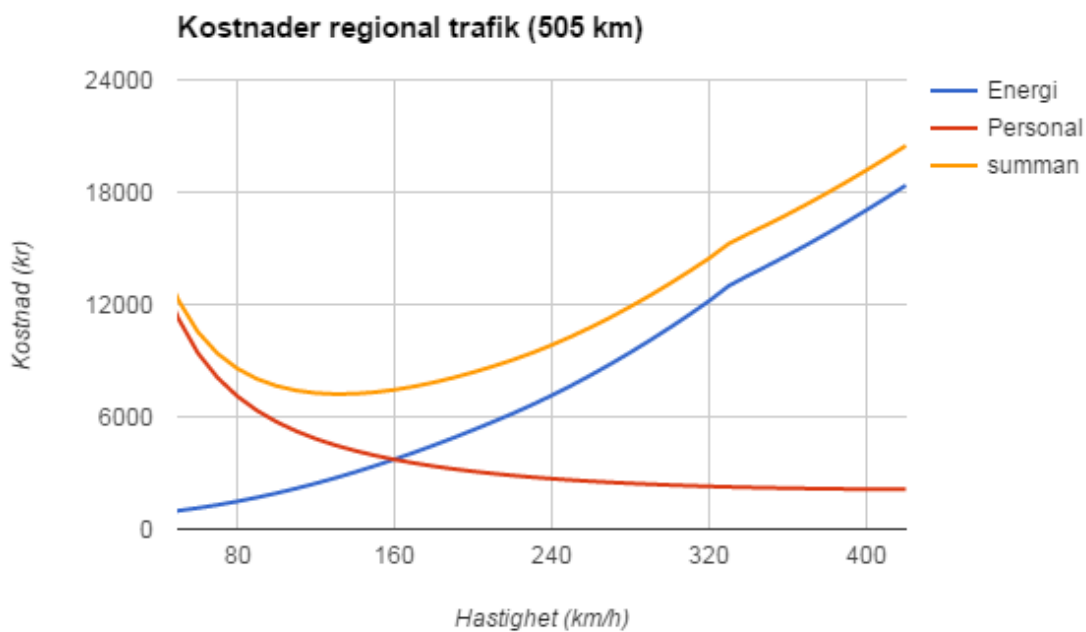


Figur 14: Kostnader över hastighet (25 km)

På de kortaste sträckorna (figur 14) beräknades den billigaste hastigheten utifrån dessa aspekter till ca 110 km/h. För direkt trafiken (figur 15) 160 km/h och för regional trafik (figur 16) 130 km/h.



Figur 15: Kostnader över hastighet interregional trafik (505 km)

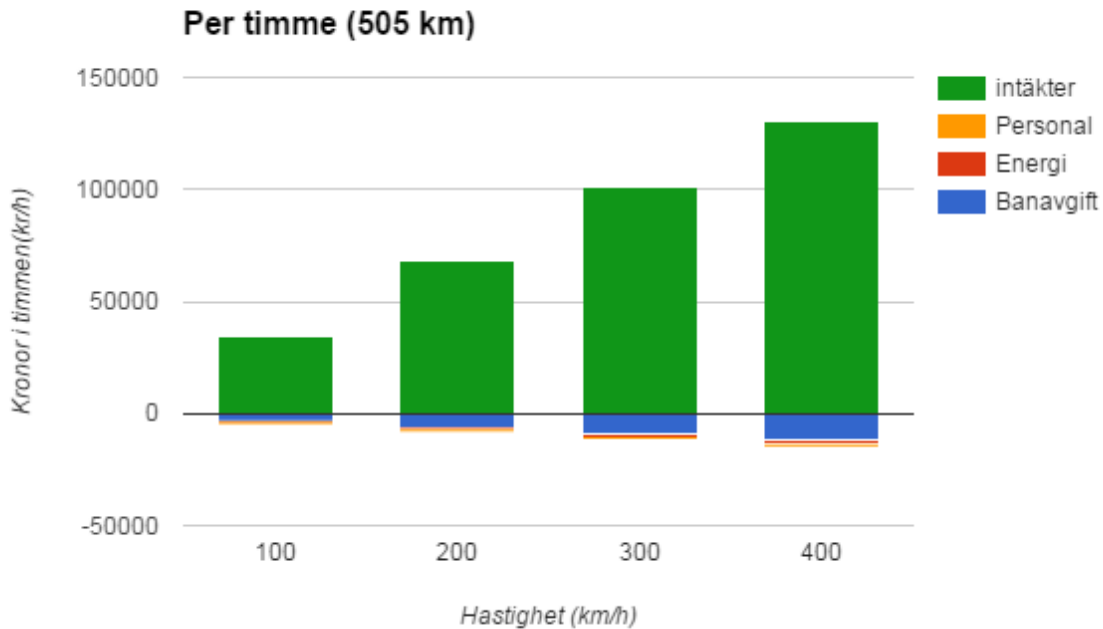


Figur 16: Kostnader regionaltrafik (505 km).

Då maxhastigheten begränsas på vissa av sträckorna vid regional trafik kan man se att funktionerna i figur 16 är något ojämna där de sträckornas kostnad blir konstanter.

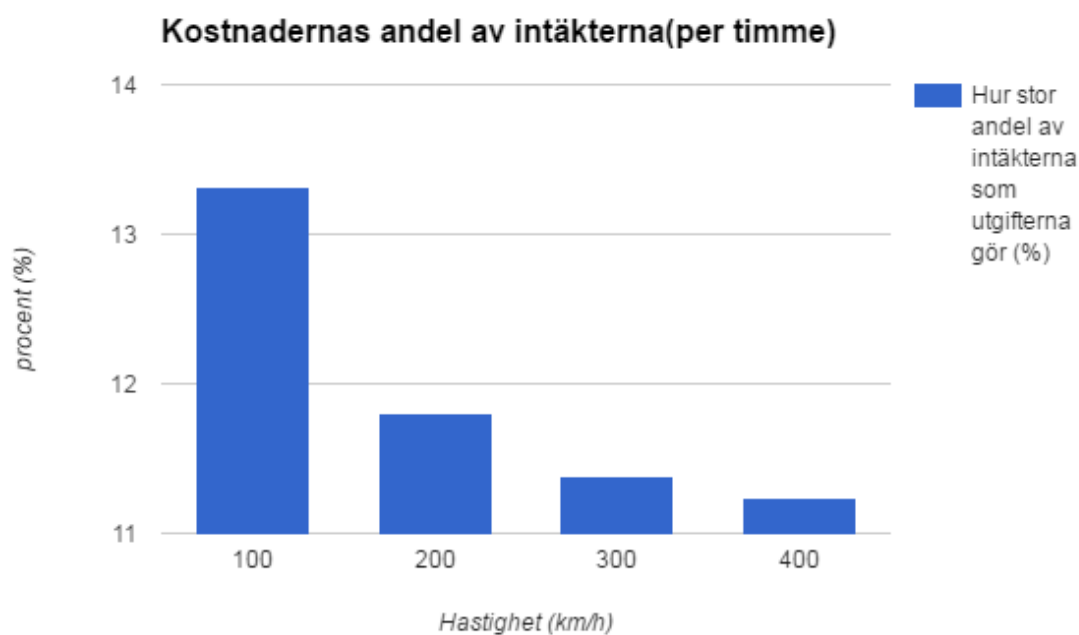
4.4 Intäkter

Då intäkterna som använts i beräkningarna inte varierar beroende på betalningsvilja, resandeutbud och kapacitet så har följande resultat uppnåtts:



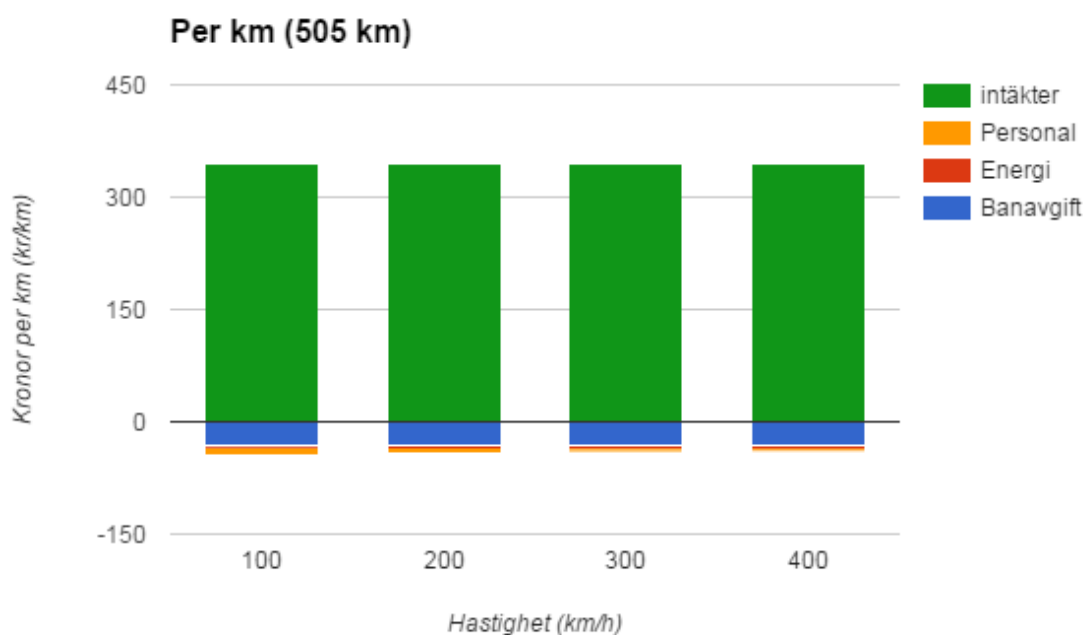
Figur 17: Intäkter per timme för interregional trafik (505 km)

Beräknas intäkter och utgifter per körd timme i olika hastigheter syns det att båda faktorer ökar med hastigheten (figur 17). Jämförs sedan förhållandet mellan intäkter och de beräknade utgifterna i figur 17 kan det observeras att den andel som utgifterna utgör av inkomsten minskar med ökad hastighet (figur 18).



Figur 18: kostnadernas andel av intäkterna för interregional trafik (per timme)

Räknat i intäkter per kilometer uppstår inte samma effekt som i figur 17 då intäkterna beräknats som konstanta (figur 19).



Figur 19: Intäkter per km för interregional trafik (505 km)

Data i figur 17-19 är baserad på att tåget kör med 60 % kapacitet, biljettpris 300 kr, banavgift 32 kr/km.

5 Diskussion

5.1 Fordon

5.1.1 Velaro D

En svensk fordonsflotta av Siemens Velaro D av den modell detta arbete baseras på är orimligt av en rad anledningar. Troligtvis hade ett tågset (cirka 200 meter långt) täckt det svenska behovet och det är vad SJ har planerat för. Med kortare tåg sjunker effekten och därmed topphastigheten då luftmotståndet påverkas ytterst lite av tåglängd. Velaro D är även designad för drift i varmare klimat med andra miljöfaktorer än dem som utgör besvär i Sverige. Men beräkningarna ger en god approximation för de flesta moderna höghastighetståg.

5.1.2 Övriga fordon

Framtidens utmaning kommer att vara att utveckla fordon som har hög effekt och låg ekvivalent massa. Med dessa förutsättningar kan en högre acceleration hållas längre och i högre hastigheter för att minimera sträckorna som krävs för att komma upp i hastigheten.

I dagsläge finns det inga minimikrav på tågvikt men däremot finns det tåg som har mindre massa och högre effekt än Valero D. Accelerationen ökar med både ökad effekt och minskad massa, dock kan massan inte vara för låg. För låg massa kan dock leda till minskad tågstabilitet och otillräcklig adhesion. I det fall det Japanska N700 valts istället för Velaro D hade den låga massan och höga effekten medfört en högre acceleration. N700 kan därför vara ett lämpligt alternativ till den regionala trafiken på sträckan Lund – Stockholm.

5.2 Banan

Den teoretiska höghastighetsbanan som beräkningarna är baserade på är en perfekt linje med approximerade avstånd då järnvägen ännu inte har blivit projekterad. Delar av sträckan Stockholm - Malmö kommer inte att klara av hastigheter över 320 km/h på grund av faktorer som kurvradier och kraftiga lutningar.

Höghastighetsjärnvägen är en stor investering som under rätt förutsättningar kommer att vara lönsam ur samhällsperspektiv (Sverigeförhandlingen & PWC, 2015). Problemet som uppstår är det politiska spelet där bidraget från kommunerna bestäms efter nyttan som de själva anser att järnvägen har för samtliga orter. För att en ort ska ha nytta av järnvägen vill den gärna ha en station. Detta resulterar i att Sverigeförhandlingen måste dela ut många stationer för att motivera tillräckligt många kommuner att bidra med kapital. Ett ökat antal stationer minskar avstånden och därefter kan hastigheten på banan inte utnyttjas fullt ut.

“Vet man vad höghastighetsbana är bra för och bör användas till så hade man reducerat antalet stationer” (Helgesson, 2017).

Enligt Mats Berg på KTH krävs det för att köra tåg i 320 km/h ett stationsavstånd på minst 60 km men 120 km är lämpligt.

En motivering till det korta stationsavståndet är att inte alla tåg behöver stanna på alla stationer utan det interregionala tåget kan köra om de regionala. Men SJ chefen Pär Helgesson håller inte med och anser att det inte är lämpligt att blanda den interregionala trafiken med regional trafik då det hämmar kapacitet.

Om banan ska trafikeras av blandad trafik kan en rimlig hastighet vara 320 km/h. I fall intresset att åka interregionalt blir större än väntat och ny teknik tillåter effektivare resor i högre hastighet uppkommer finns det en chans att banan är underprojekterad. Historiskt sett har hastigheterna på järnväg ökat stadigt och det finns ingen indikation att utvecklingen skulle stanna av. Den tekniska livslängden av banan kommer vara 120 år (Sverigeförhandlingen, 2016). Inom denna tidsram förväntas hastigheterna att öka till cirka 450 km/h (se figur 2).

Med tanke på att nationer redan idag bygger för högre hastigheter är detta ett mycket möjligt scenario, ombyggnation av hela sträckan skulle då bli mycket kostsam.

5.3 Kostnader & intäkter

5.3.1 Kostnader

Under acceleration och retardation ökar slitaget på både fordon och bana på grund av ökade deformationer i hjul och räl (Andersson , et al., 2014). Med andra ord kommer regional trafik att slita avsevärt mer än interregional och bidra till en större underhållskostnad för både infrastruktur förvaltaren och operatören. Att införa en slitageanpassad banavgift har länge diskuterats men det verkar hittills inte som att det kommer att finnas på den nya banan. En sådan avgift hade troligtvis gynnat den interregionala trafiken om den inte enbart baserades på hastighet.

I fall ett 25 kV system hade installerats istället för det traditionella svenska 15 kV hade 4 % (Persson & Petersson, 2014) av energikostnaden besparats i energiförluster. Då höghastighetsbanan ska byggas som ett separat system hade detta troligtvis inte inneburit någon större investering.

Det finns en rad andra faktorer som påverkar arbetstimmarna såsom uppehållstider, väntan på körtillstånd och tågvändning. Dock är denna studie

är bunden till hastigheten kan dessa kostnader räknas som konstanta och där av irrelevanta.

5.3.2 Intäkter

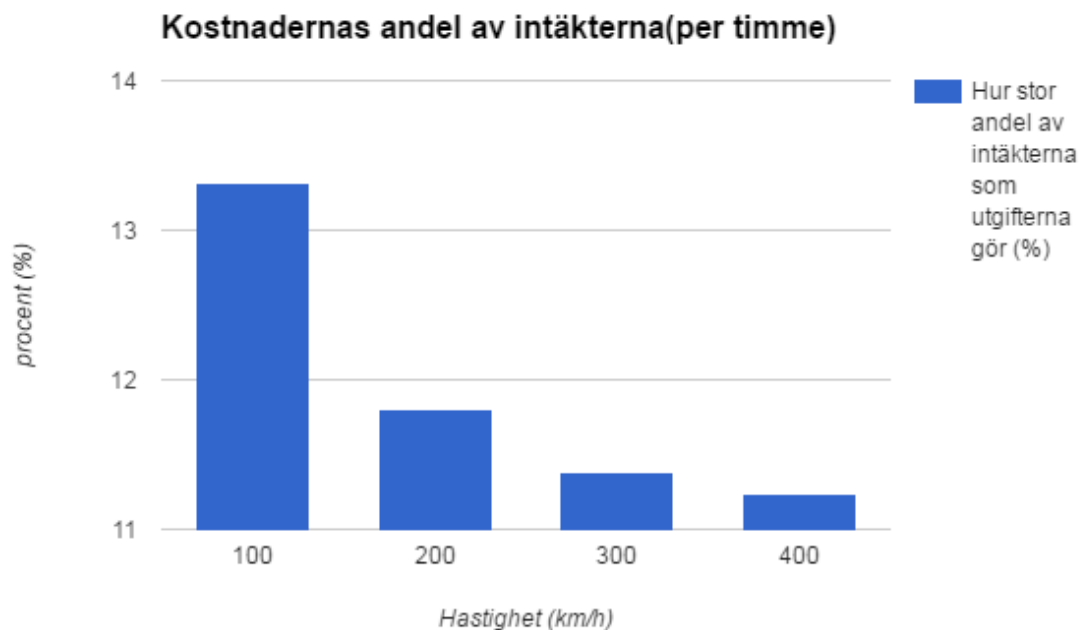
Beräkningarna är baserade på ett fixerat biljettpris som kan anses som absolut minimum i dagens läge mellan Lund – Stockholm. Medelbiljetten kostar idag uppskattningsvis 400-600 kr. Om samma resa i framtiden kan köras på halva tiden och dessutom med högre pålitlighet kommer ett högre biljettpris vara möjligt. Intäkterna ökar kraftigare med hastigheten än energikostnaden även utan ett varierande biljettpris (se figur 21).

Den officiella motiveringen för att bygga många stationer är att få fler resenärer på sträckan. Om den regionala trafiken äventyrar den interregionala trafikens pålitlighet och resetid så kan resultatet dock vara motsatsen.

5.3.3 Jämförelse

Asynkronmotorer har enligt "Green train, Concept proposal for Scandinavian high-speed train" 91-94% effektivitet. I beräkningarna har det tagits hänsyn till dessa faktorer, vilket resulterade i att den minst kostsamma hastigheten minskade. Den minst kostsamma hastigheten hamnade avsevärt lägre än förväntat. Resultatet berodde på att personalkostnaden minskade kraftigt mellan 0 och 100 km/h (se figur 15). 100 till 200 km/h är den minst kostsamma hastigheten ur energiförbrukning och personalkostnadsperspektiv (se figur 15) men däremot inte den mest lönsamma hastigheten för operatörerna. Detta då inkomst per körd timme ökar kraftigare än vad kostnaderna gör (se figur 21). Detta resultat kan ses trots att beräkningarna inte tar hänsyn till att en kortare resetid ger en högre betalningsvilja och fler resenärer.

Figur 20 visar det procentuella förhållandet mellan kostnader och intäkter över hastigheten.



Figur 20: Kostnadernas andel av intäkterna per timme för interregional trafik (505 km). Kostnaderna som ingår i beräkningen är banavgift, energi- & personalkostnad.

I figur 21 (sida 29) syns också att en hastighetshöjning från 100 till 400 km/h ökar intäkterna. Detta gäller åtminstone under hastighetsintervallet 0 till 420 km/h och efter detta intervall förväntas kostnadernas andel av intäkterna stiga. Om man på sträckan Norrköping - Linköping (25 km) betalar 261 kr mer i personal och energikostnad för att köra 270 km/h istället för 320 km/h sparas 18 sekunder. Det kan det anses lönsamt om man räknar ur samhällsekonomisk synpunkt men en sådan marginell tidsvinst är troligtvis inte lönsam ur operatörernas synpunkt.

6 Slutsatser

6.1 Bana

Den regionala trafiken har stationsavstånd ner till 25 km där hastigheten begränsas redan vid 320 km/h. En hastighetsökning för den regionala trafiken medför på grund av denna begränsning inte någon större tidsvinst och är svårmotiverad.

Vid interregional trafik anser vi att det är mycket lönsamt att höja hastigheten med 100 km/h då tidsbesparingen motsvarar 21 % av resan.

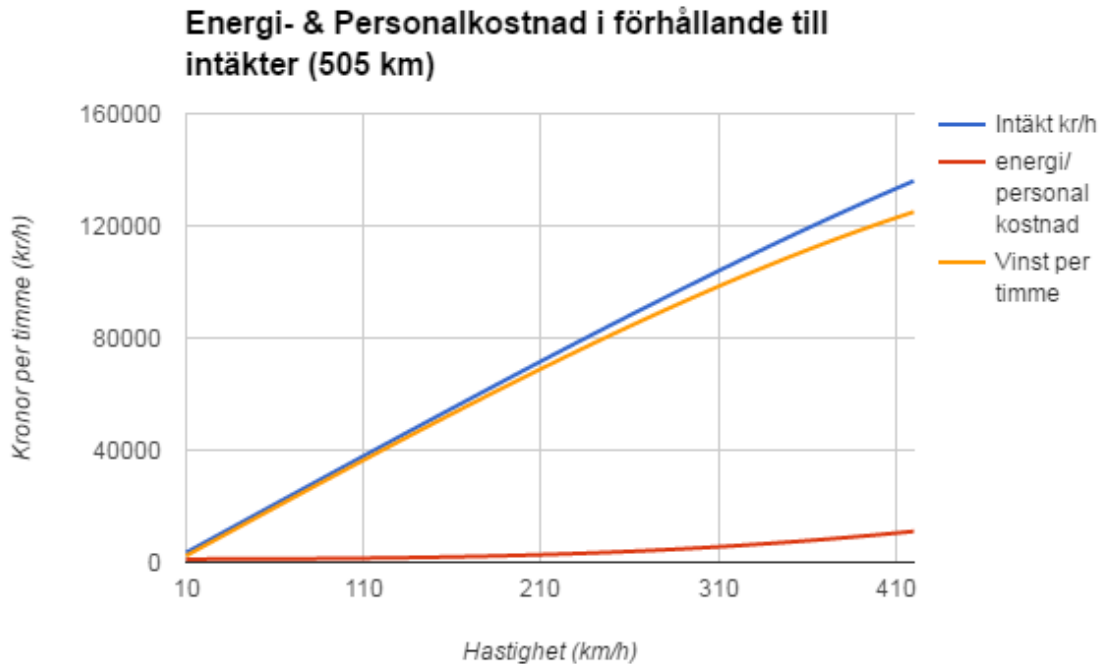
Kontaktpersoner från både forskningsvärlden och fordonsoperatörerna verkar enas om att stationsavståndet är för kort för att nyttja höghastighetsjärnvägens sanna potential.

Ett flertal länder i världen har redan byggt höghastighetslinjer med stor framgång upp till STH 350 km/h (Japan Railway & Transport Review , 2011). I Sverige är många skeptiska över att bygga i den planerade hastigheten 320 km/h. Byggs banan enligt tidsplanen så kommer den i bästa fall vara färdig 2035 (Sverigeförhandlingen & PWC, 2015) utöver detta så förväntas banan ha en teknisk livslängd på 120 år (Sverigeförhandlingen, 2016). Inom denna tidsram finns det en stor chans att omvärlden uppnått ännu högre hastigheter och banan kan vara omodern redan vid invigning.

6.2 Personalkostnad & energiförbrukning

Ett tåg har maximal energiförbrukning då det accelererar. Energikostnaden per kilometer är större i de fall där accelerationen utgör en större del av körtiden. En investering i ökad energiförbrukning för att höja hastigheten är många gånger mindre än den ökning av intäkter som det resulterar i. Åtminstone för avstånden 120 km och uppåt.

För direkttrafiken (505 km) så motsvarar energi och personalkostnaden 2,1 % av intäkterna per timme i 300 km/h och 2,0 % av intäkterna per timme i 400 km/h. Trots att energikostnaden ökar med hastigheten så ökar intäkterna per timme i en snabbare takt under hastighetsintervallen som undersökts.



Figur 21: Energi och personalkostnad i förhållande till intäkter (505 km)

Approximerar man linjen “vinst per timme” linjen (gul) i figur 21 med en ekvation får man:

$$f(x) = -0,3197x^3 + 5,5067x^2 + 3355x - 4086,2 \quad [3]$$

Där $f'(636) = 0$ “vinst per timme” ökar alltså i en avtagande takt fram tills hastigheten 636 km/h under förutsättningen att gångmotstånden fortsätter med samma trend i högre hastigheter. Andel ockuperade säten och biljettprisernas ökning med hastigheten hade även varit en faktor som påverkat hastigheten positivt. Variabler med detta tanke sätt är att avståndsfixerade avgifter såsom slitage samt avgifter “per resa” såsom spårläge också ökar i kostnad per timme och påverkar resultatet.

6.3 Trafikering

Blandad regional och interregional trafik på ett och samma höghastighetsnät är problematiskt. På sträckan Lund - Stockholm kommer stationsavståndet vara oregelbundna, på vissa sträckor ner till 25 km. För att komma upp i de högre hastigheterna mellan stationerna krävs långa och energi kostsamma accelerationsavstånd. I PWC’s rapport lyfter de fram hur en blandad trafik ställer större krav på trafikplaneringen och drar tydliga paralleller mellan förseningar och blandad trafik. Med en högre hastighet på den interregionala trafiken ökar hastighetsklyftan och därmed mängden förlorad kapacitet. Om den regionala trafiken däremot bara stannar på vissa av stationerna till exempel med ett avstånd över 60 km blir kapacitetsproblemet mindre. Det blir då enklare att motivera en högre hastighet vid tät trafikering.

Så länge resandebehovet för interregional trafik är mättad och det finns kapacitet för regional trafik fungerar konceptet ”blandad trafik”. Chansen finns att den interregionala trafiken kommer bli så aktuell att trafikplanerarna helt enkelt tar bort den regionala trafiken och då kommer de ”små” stationerna vara överflödiga.

6.4 Felkällor

Samtliga beräknade sträckor i denna rapport är baserade på estimeringar utifrån de tillgängliga ÅVS:erna. Sträckorna kan skilja med plus/minus några kilometer.

Vid accelerationsberäkningar och gångmotstånd har vikten av ett fullsatt tåg använts det vill säga har 970x80 kg adderats till tågets massa.

Gångmotståndet består av fyra faktorer, rullmotstånd, luftmotstånd, kurvmotstånd och lutningsmotstånd. De två sistnämnda har estimerats utifrån rullmotståndet som ett påslag av 20 % (Berg, 2017).

Intäkterna som använts vid uppskattning har baserats på biljettpriset 300 kr vilket är en underskattning av dagens priser för sträckan Lund – Stockholm. Dessutom förväntas priset att öka vid en kortare resetid.

Elpriserna är baserade på priset i januari 2017 enligt Trafikverkets prislista, kostnaden per kWh förväntas öka men är oförutsägbar 10 år framåt (Trafikverket, 2016 b).

7 Referenser

- Lindfeldt, A., 2009. *Kapacitetsanalys av järnvägsnätet i Sverige- Delrapport 2*, Stockholm: KTH.
- Andersson, E., Berg, M. & Stichel, S., 2014. *Rail Vehicle Dynamics*. Stockholm: KTH.
- Andersson, E., 2012a. *Green train Concept Proposal for a scandinavian high-speed train*. Stockholm: KTH.
- Andersson, E., 2012. *Green train-Concept Proposal for a Scandinavian high-speed train*. Stockholm: KTH.
- Andersson, E., Berg, M. & Stichel, S., 2016. *Nya stambanor till lägre kostnader*, Stockholm: KTH.
- Andersson, E., Berg, M., Stichel, S. & Casanueva, C., 2017. *Rail System and Rail Vehicles part 1*. Stockholm: KTH.
- Andersson, E., Berg, M., Stichel, S. & Casanueva, C., 2017. *Rail System and Rail Vehicles part 2*. Stockholm: KTH.
- Berg, M., 2017. *Professor på kth* [Intervju] (20 mars 2017).
- Corshammar, P., 2012. *Perfekt spår-Geometri*. Lund: Järnvägskola.
- Ekblom, A., 2017. *Personal Kostnad* [Intervju] (15 mars 2017).
- Eniro, 2017. *Eniro*. [Online]
Available at: <https://www.eniro.se/>
- Frey, S., 2012. *Railway Electrification systems and engineering*, Prakashdeep Bldg: u.n.
- Fröidh, O. & Nelldal, B.-L., 2008. *Tåget till framtiden - järnväg 200 år 2056*, Solna: u.n.
- Gustavsson, T., 2017. *Höghastighetsjärnväg* [Intervju] (02 Mars 2017).
- Hansson, J. & Grahn, M., 2013. *Utsikt för förnybara*, Stockholm: IVL Svenska Miljöinstitutet AB.
- Helgesson, P., 2017. *SJ chef* [Intervju] (20 mars 2017).
- Hyden, C., 2010. *Trafiken i den hållbara staden*. Lund: u.n.
- Japan Railway & Transport Review, 2011. *Expansion of High-Speed Rail Services*. [Online]
Available at: <http://www.ejrcf.or.jp/jrtr/jrtr57/pdf/36-41web.pdf>
- Johansson, C., 2017. *Stationsavstånd* [Intervju] (15 mars 2017).
- Järnvägsgruppen på KTH, 2010. *Höghastighetsbanor i Sverige*, Stockholm: KTH.
- Järnvägsgruppen, 2016. *KTH Järnvägsgruppen yttrande över delrapporten "Sverigeförhandlingen. Höghastighetsjärnvägens finansiering och kommersiella förutsättningar"*, Stockholm: u.n.
- Lindfeldt, A., 2014. *Kapacitetsutnyttjande i det svenska järnvägsnätet*, Stockholm: u.n.
- Linfeldt, A., 2013. *Kapacitetsutnyttjande i det svenska järnvägsnätet*, Stockholm: u.n.

Nelldal, B.-L., 2008b. *Höghastighetsbanor i Sverige*, Stockholm: u.n.

Nelldal, B.-L., 2008. *Höghastighetsbanor i Sverige – Götalandsbanan och Europabanan*, Stockholm: u.n.

Nelldal, B.-L., Lindfeld, A. & Lindfeld, O., 2009. *Kapacitetsanalys av järnvägsnätet i Sverige, Delrapport 1*, Stockholm: Linköpings universitet .

Persson , T. & Petersson, A., 2014. *Jämförelse av traktionssystem på Ostlänken*, Lund: u.n.

Regeringskansliet, 2016. *Regeringskansliet.se*. [Online]
Available at: <http://www.regeringen.se/regerings-politik/transporter-och-infrastruktur/mal-for-transporter-och-infrastruktur/>

Siemens AG 2016, 2017. *Velaro D (Class 407)*, Munich: u.n.

Siemens AG, 2017b. *High-speed trainset Velaro D for Deutsche Bahn AG (German Rail)*, 91050 Erlangen: Siemens.

Sverigeförhandlingen & PWC, 2015. *Kommersiella förutsättningar för höghastighetståg i Sverige*, u.o.: Sverigeförhandlingen .

Sverigeförhandlingen, 2016. *Sverigeförhandlingen.se*. [Online]
Available at: <http://sverigeforhandlingen.se/pastaenden-hhj/>
[Använd 25 04 2017].

Trafikverket, 2014. *TDOK 2014:0075*, Borlänge: u.n.

Trafikverket, 2014. *TDOK: 2014:0159*, Stockholm: u.n.

Trafikverket, 2016 b. *Trafikverkets elprisrapport*, Borlänge: Trafikverket.

Trafikverket, 2016. *Trafikverket.se*. [Online]
Available at: <http://www.trafikverket.se/for-dig-i-branschen/teknik/elabonnemang-och-elhandel/elens-ursprung-och-miljopaverkan/>

Trafikverket, 2016. *Trafikverket.se*. [Online]
Available at: <http://www.trafikverket.se/for-dig-i-branschen/teknik/elabonnemang-och-elhandel/elens-ursprung-och-miljopaverkan/>

Trafikverket, 2016. *ÅVS, Lägesbeskrivning-- åtgärdsvalsstudie Jönköping–Malmö och ÅVS, Lägesbeskrivning Linköping-Borås*, Stockholm: u.n.

Trafikverket, 2017. *trafikverket.se*. [Online]
Available at:
<http://www.trafikverket.se/contentassets/3598c55537c1413d82cc2bcc756ecbb-c/2017-01-elprisrapport.pdf>

Trafikverket, u.d. *Trafikverket.se*. [Online].

WSP Analys & Strategi, KTH Järnvägsgruppen, 2008. *Höghastighetståg – affärsmässighet och samhällsnytta*, Stockholm: KTH.

Bilaga 1

P=(kW)	1,140				delta tid (s)	total tid (s)	sträckta (m)	total sträckta (m)	Diffretandradion (-m/s ²)	Total tid (s)	Total sträckta (m)	Total sträckta, broms + acceleration (km)	Energi accelereri (kWh)	Energi behållna v (kWh)
	Hastighet (km/h)	Hastighet (m/s)	Dragkraft (kN)	Gångomstånd (kN)										
0	0	683.77	17.02656	0.6	4.62962963	4.62962963	6.430041152	6.430041152	0.6	4.62962963	6.430041152	0.0128600823	1.327549851	27.00976705
10	2.77777777	683.77	8.945277037	0.6	4.62962963	9.259259259	19.29012346	25.72016461	0.6	9.259259259	25.72016461	0.05144032922	5.310196403	57.64580882
20	5.55555555	683.77	10.31822667	0.6	4.62962963	13.88888889	32.15020576	57.87037037	0.6	13.88888889	57.87037037	0.11574707407	11.94794866	93.43513822
30	8.33333333	683.77	11.25237926	0.6	4.62962963	18.51851852	45.01028907	102.8805584	0.6	18.51851852	102.8805584	0.2057613169	21.24079761	135.9937362
40	11.11111111	683.77	12.35945307	0.6	4.62962963	23.14814815	57.87037037	160.7510288	0.6	23.14814815	160.7510288	0.3215020576	33.18974627	186.5782716
50	13.88888888	683.77	13.63304	0.6	4.62962963	27.77777778	70.73045267	231.4814815	0.6	27.77777778	231.4814815	0.482962963	47.79179482	248.9852413
60	16.66666666	683.77	15.07614815	0.6	4.62962963	32.40740741	83.90053498	315.0720165	0.6	32.40740741	315.0720165	0.6301440329	65.04994282	318.6511424
70	19.44444444	683.77	16.6877481	0.6	4.62962963	37.03703704	96.45061728	411.5228337	0.6	37.03703704	411.5228337	0.8230452675	84.86319044	403.1024716
80	22.22222222	683.77	18.46792	0.6	4.62962963	41.91394831	116.0057482	527.528392	0.6	41.66666667	520.8333333	1.048981715	108.1472291	501.885728
90	25	640	18.46792	0.5164526895	5.378571618	47.32878329	141.8345288	689.4829108	0.6	48.2962963	644.9041152	1.312467028	134.2038853	616.4674024
100	27.77777777	576	20.4165837	0.4636194431	5.99156222	53.32035551	174.7538961	844.2168089	0.6	50.82582683	778.0349794	1.622251788	163.2155743	748.4338877
110	30.55555555	523.63636	22.5376583	0.4198637526	6.820633861	58.94098887	211.4824546	1055.708283	0.6	55.55555556	925.8282958	1.881635189	195.2611673	888.2920089
120	33.33333333	480	24.81946867	0.3821391462	7.269021783	67.21001065	252.3965987	1308.105853	0.6	60.18518519	1086.676955	2.394782808	230.4348972	1070.567933
130	36.11111111	443.07692	27.27368593	0.3498263384	7.940447797	75.15045945	297.766924	1605.872646	0.6	64.81481481	1260.289066	2.866160711	268.8487767	1283.789266
140	38.88888888	411.42857	29.8964237	0.3215313174	8.639213747	83.78967219	347.9683315	1953.840977	0.6	69.44444444	1446.792259	3.400600236	310.6354651	1480.479507
150	41.66666666	384	32.68768	0.296444094	9.370325921	93.15999812	403.4445883	2357.285565	0.6	74.07407407	1646.090535	4.0033761	355.9617061	1722.16815
160	44.44444444	360	35.64745481	0.2739520709	10.13964877	103.2996469	464.7339018	2822.019467	0.6	78.7037037	1858.291893	4.68030136	404.9824996	1990.306995
170	47.22222222	338.82352	38.7574815	0.253863216	11.425374815	114.2537487	532.4411082	3354.510576	0.6	83.33333333	2083.333333	5.43784391	457.9622231	2286.643636
180	50	320	42.07256	0.2349683772	11.82192179	126.0736715	607.5142511	3902.020011	0.6	87.96296296	2321.244856	6.283270857	515.1009901	2612.483472
190	52.77777777	303.15789	45.53789037	0.217813836	12.75299048	138.828682	680.7668845	4652.812986	0.6	92.59259259	2572.016641	7.224829447	576.752378	2969.426899
200	55.55555555	288	48.1773926	0.2018837347	13.75629459	152.5879566	783.5153862	5436.328372	0.6	97.22222222	2835.648148	8.27197652	643.2648858	3358.998814
210	58.33333333	274.28571	52.97410667	0.2	13.88888889	166.4768451	829.4753068	6265.802861	0.6	101.8518519	3112.139918	9.377943588	714.1144153	3782.79331
220	61.11111111	261.47978	56.94499259	0.2	13.88888889	180.3657343	888.0555556	7133.855236	0.6	106.4814815	3401.49177	10.5335101	793.2093645	4242.141695
230	63.88888888	312.05760	61.08439704	0.2	13.88888889	194.2546232	906.6356025	8040.495039	0.6	111.1111111	3703.703704	11.74418674	881.3506385	4738.374356
240	66.66666666	331.88833	65.39232	0.2	13.88888889	208.1435121	945.2160494	8985.711088	0.6	115.7407407	4018.77572	13.00448681	978.8150754	5274.121092
250	69.44444444	351.10748	69.86876148	0.2	13.88888889	222.032401	983.7862963	9969.507384	0.6	120.3703704	4346.707819	14.3162152	1085.892807	5849.741101
260	72.22222222	369.82888	74.51372148	0.2	13.88888889	235.9212889	1022.376543	10981.88383	0.6	125	4687.5	15.67838383	1202.887019	6467.14888
270	75	388.14885	79.3272	0.2	13.88888889	249.8101788	1080.86679	12052.84072	0.6	128.6296296	5041.152283	17.09398298	1330.113757	7127.874225
280	77.77777777	406.14946	84.30919704	0.2	13.88888889	263.6960677	1089.537037	13152.37775	0.6	134.2582583	5407.664609	18.56004236	1487.901784	7833.440333
290	80.55555555	423.90102	89.4591259	0.2	13.88888889	277.5876566	1138.117284	14290.48504	0.6	138.8888889	5787.037037	20.07752208	1618.582356	8565.374802
300	83.33333333	441.48416	94.77874687	0.2	13.88888889	291.4788454	1178.697531	15467.19257	0.6	143.5185185	6178.289547	21.64646212	1778.539307	9385.204128
310	86.11111111	458.89144	100.2682983	0.2	13.88888889	303.3657343	1215.277778	16682.47035	0.6	148.1481481	6584.26214	23.28682348	1948.108786	10234.65481
320	88.88888888	476.22881	105.9223704	0.2	13.88888889	315.1435121	1250.716048	17682.47035	0.6	152.7777778	7002.314815	24.89250121	2228.658888	11134.65334
330	91.66666666	285.59253	111.74686	0.1	27.77777778	360.9212899	1258.976543	21775.06234	0.6	157.4074074	7433.124815	26.19250121	2442.991365	12087.32622
340	94.44444444	282.86477	117.7400861	0.1	27.77777778	388.6990677	2862.037037	24437.09988	0.6	162.037037	7876.800412	32.31390039	2677.302594	13093.99994
350	97.22222222	300.15319	123.9016948	0.1	27.77777778	416.4768454	2739.197531	27178.29751	0.6	166.6666667	8333.333333	35.80863084	2992.722528	14156.20101
360	100	317.48530	136.7305037	0.1	27.77777778	444.2546232	2816.356025	29992.65553	0.6	171.2962963	8802.726337	38.79538187	3210.102538	15475.29151
370	102.77777777	334.88954	143.3976859	0.1	27.77777778	472.032401	2898.518519	32888.17405	0.6	175.9282958	9284.979424	42.17115347	3510.329098	16593.2915
380	105.55555555	352.37571	150.2333887	0.1	27.77777778	499.8101788	2970.079012	36956.83306	0.6	180.5655556	9780.092993	45.63894566	3834.286325	17691.23322
390	108.33333333	369.67532	157.2376059	0.1	27.77777778	527.5876566	3047.839506	38904.69257	0.6	185.1851852	10288.06884	48.19275841	4182.933237	18890.80863
400	111.11111111	387.70188	164.4103437	0.1	27.77777778	555.3657343	3125	42029.69257	0.6	189.8148148	10808.89918	52.83859175	4557.190088	20353.54386
410	113.88888888	405.57114	171.7516	0.1	27.77777778	583.1435121	3202.160484	45231.85306	0.6	194.4444444	11312.92959	56.57444566	4958.041053	21780.99641
420	116.66666666	423.58733												