

Thesis 304

Programvaror för arbetet med höghastighetsjärnväg

Statiska och dynamiska analyser för bank och undergrund

Ina Söderbäck

Trafik och Väg
Institutionen för Teknik och Samhälle
Lunds Tekniska Högskola
Lunds Universitet



Copyright © Ina Söderbäck

LTH, Institutionen för Teknik och samhälle
CODEN: LUTVDG/(TVTT-5271)/1-64/2017
ISSN 1653-1922

Tryckt i Sverige av Media-Tryck, Lunds universitet
Lund 2017

Examensarbete

CODEN: LUTVDG/(TVTT-5271)/1-64/2017

Thesis / Lunds Tekniska Högskola,
Institutionen för Teknik och samhälle,
Trafik och väg, 304

ISSN 1653-1922

Author: Ina Söderbäck
Title: Programvaror för arbetet med höghastighetsjärnväg – Statiska och dynamiska analyser för bank och undergrund
English title: Software for the high-speed train project – Static and dynamic analysis of the embankment and subgrade
Language: Swedish
Year: 2017
Keywords: höghastighetsjärnväg; programvaror; sättningar; dynamiska effekter; höghastighetsfenomenet; validering
Citation: Ina Söderbäck, Programvaror för arbetet med höghastighetsjärnväg – Statiska och dynamiska analyser för bank och undergrund. Lund, Lunds universitet, LTH, Institutionen för Teknik och samhälle. Trafik och väg 2017. Thesis. 304

Abstract:

At present there is an ongoing investigation of a Swedish high-speed rail. It is decided that the railway will be constructed with a slab track and mainly be founded on an embankment. There is an uncertainty in how to conduct stability and settlement calculations for the embankment and subgrade and how dynamic effects should be considered. The present Master's thesis aims to analyze appropriate software for static as well as dynamic calculations.

Slab tracks provide a higher stability of the track but a key issue is that practically all settlements must be avoided. The dynamic effects are related to the train speed and resonance may occur if the train speed approaches the so called critical speed of the railway system. Ten persons have been interviewed in this thesis. To estimate the settlements in the embankment and subgrade the interviewees seem to agree that a finite element software intended for geotechnical analysis is the best alternative. Concerning the dynamic effects most of the interviewees reckon that a dynamic analysis mainly aims to consider the risk for resonance. Dynamic analysis and settlement analysis are considered to be two separate kinds of simulations. There is an uncertainty about to what extent it will be necessary to consider the dynamic effects. For dynamic calculation general-purposed finite element programs are considered to be the best alternative.

Trafik och väg
Institutionen för Teknik och samhälle
Lunds Tekniska Högskola, LTH
Lunds Universitet
Box 118, 221 00 LUND

Transport and Roads
Department of Technology and Society
Faculty of Engineering, LTH
Lund University
Box 118, SE-221 00 Lund, Sweden

Innehållsförteckning

Förord	2
Sammanfattning	4
Summary	7
1 Inledning	10
1.1 Bakgrund	10
1.2 Syfte	11
1.3 Avgränsningar	11
1.4 Rapportens disposition	11
2 Metod	14
2.1 Litteraturstudie	14
2.2 Intervjumetodiken	14
2.3 Hur intervjuerna har genomförts	15
2.4 Presentation av de intervjuade	15
2.5 Redovisning av intervjuer	16
3 Teori	18
3.1 Järnvägsteknik	18
3.2 Teknisk systemstandard för höghastighetsbanor (TSS)	23
3.3 Den dynamiska lastens effekter	24
3.4 Sättningskrav	25
3.5 Grundläggningsmetoder	26
3.6 Materialmodeller och programvaror	28
4 Resultat och analys	35
4.1 Förutsättningar	35
4.2 Programvaror för sättningsberäkningar	35
4.3 Dynamiska lastens effekter	38
4.4 Dynamiska beräkningar och programvaror	42
4.5 Validering	44

5	Diskussion och slutsatser	48
5.1	Resultatdiskussion	48
5.2	Metoddiskussion	50
5.3	Slutsatser	50
6	Referenser	53
	Bilaga A – Underlag för intervju	57
	Bilaga B - Intervjufrågor	58

Förord

Detta examensarbete är utfört som en del av utbildningen Väg och vatten vid Lunds tekniska högskola för avdelningen Trafik och väg. Arbetet har pågått under våren 2017 i samarbete med Sweco Rail i Malmö.

Jag vill tacka min handledare Anders Lenngren från Sweco för hans uppslag och stöd genom hela arbetet samt Johanna Appelberg från Sweco för all hennes hjälp. Vidare vill jag tacka min handledare Andreas Persson från LTH för alla hans tips och råd.

Slutligen vill jag också rikta ett stort tack till alla de som har ställt upp på intervjuer. Utan er hade det här examensarbetet inte varit möjligt.

Lund, Maj 2017

Sammanfattning

Världens första höghastighetsbana byggdes mellan Tokyo och Osaka år 1964. Sedan dess har länder i framförallt Asien och Europa också infört höghastighetståg och just nu pågår arbetet med höghastighetsjärnväg i Sverige. Den kommer att trafikeras av höghastighetståg med en hastighet upp till 320 km/h. Det är beslutat att järnvägen ska utformas med fixerade spår vilket är den vanligaste lösningen för höghastighetsbanor. Banan ska till största delen gå på bank och det råder en osäkerhet kring hur sättningsberäkningar för bank och undergrund bör utföras och hur dynamiska effekter bör beaktas.

Det här examensarbetet syftar till att utreda vilka befintliga programvaror som anses lämpliga att använda i arbetet med höghastighetsjärnvägen med avseende på både statiska och dynamiska beräkningar för bankmaterial och undergrund. Det ska även utredas i vilken utsträckning dynamiska effekter bör beaktas och hur beräkningsmodellerna kan valideras. Arbetet har inletts med en litteraturstudie och en inventering av befintliga programvaror för att ge underlag till den intervjustudie som sedan genomförts. Studien bestod av kvalitativa intervjuer som genomfördes för att samla in information och för att sammanställa olika uppfattningar.

Fixerade spår ger en större stabilitet än ballastspår vilket gör att deformationer av spåret blir mindre förekommande, förutsatt en god grundläggning. Jämfört med ballastspår har fixerade spår även ett lågt underhållsbehov. En utmaning med fixerade spår är däremot att det kräver att det i princip inte uppkommer några sättningar. För ballastspår går det att kompensera för lokala sättningar genom att tillföra ballast så att spårgeometrin återställs. För fixerade spår innebär däremot en större ändring av spårets position omfattande arbete.

Järnvägskonstruktioner utsätts för dynamiska krafter som tågtrafiken ger upphov till. Dessa dynamiska laster är hastighetsberoende och för tåg på spår riskerar ett resonansfenomen/höghastighetsfenomen att uppkomma ifall tåget närmar sig en så kallad "kritisk hastighet". Den kritiska hastigheten beror på en kombination av spårets och jordens egenskaper. Styvheten hos såväl spåret som banken och den underliggande jorden är viktiga för att uppnå en hög kritisk hastighet.

Tio personer med olika bakgrund har intervjuats och deras svar har sammanställts. Flera av de intervjuade lyfter några av de speciella förutsättningar som finns i projektet med höghastighetsbanorna i och med att de ska utformas med fixerade spår. Utmaningar ligger i de strikta sättningskraven och att det är en för oss ny byggteknik. För att beräkna sättningar i bank och undergrund är de intervjuade i stort sett eniga om att något finita elementprogram (FEM-program) anpassat för geotekniska tillämpningar som är aktuellt. Programmet bör erbjuda anpassade materialmodeller för att underlätta analysen. Exempel på programvaror som nämns är Plaxis, Zsoil, Comsol Multiphysics och finita differensprogrammet Flac. En av de intervjuade är även inne på att använda programvaran Particle Flow Code (PFC) som är ett program som använder "Distinct Element Method".

De flesta av de intervjuade anser att dynamiska analyser främst eller endast syftar till att utvärdera risken för att det uppstår ett resonansfenomen genom att analysera den kritiska hastigheten för järnvägssystemet. Man ser gärna att dessa dynamiska analyser genomförs under linjärelastiska förhållanden. Några av de intervjuade beskriver att det är möjligt att genomföra geotekniska icke-linjära, dynamiska analyser med att det är komplicerade

beräkningar som det finns en begränsad erfarenhet av. Dynamiska analyser och sättningsberäkningar ses som två olika typer av analyser. I hur stor utsträckning det kommer att vara nödvändigt att analysera de dynamiska effekterna råder det en viss osäkerhet kring.

För de dynamiska beräkningarna ses också FEM-program som det främsta alternativet. Några är inne på att det främst handlar om beräkningsingenjörens preferens och färdighet vid val av program. Många av de intervjuade utgår från att de dynamiska beräkningarna görs under linjärelastiska förhållanden och det är främst olika generella FEM-program som diskuteras för det ändamålet.

För att validera såväl sättningsberäkningar som dynamiska analyser anser många av de intervjuade att det bästa är att göra försök i full skala och att det i höghastighetsprojektet hade kunnat vara ett bra alternativ att bygga upp en provbank.

Summary

The first high-speed rail in the world was constructed between Tokyo and Osaka in 1964. Since then many countries in primarily Asia and Europe have developed high-speed train systems. Recently, there has been an ongoing investigation of a Swedish high-speed rail that will allow for a speed of 320 km/h. It is determined that the railway will be constructed with a slab track which is the most common solution for high-speed rail. The railway will mainly be founded on an embankment and there is an uncertainty in how to conduct stability and settlement calculations for the embankment and subgrade and how dynamic effects should be considered.

The present Master's thesis aims to analyze appropriate software for static as well as dynamic calculations for embankment and subgrade in the high-speed rail project. It is also to study to what extent the dynamic effects are to be considered and how the simulations can be validated. This Master's thesis project began with a literature review and an inventory of available software. Later qualitative interviews were conducted to gather information and put together different opinions.

Slab tracks provide a higher stability of the track, compared to ballast track. That results in less alterations in track position, given that there is a good foundation. Compared to a ballast track a slab track is to a large extent maintenance free. A key issue with slab tracks is that practically all settlements must be avoided. For ballast track, local settlements can be mitigated through ballast filling in order to recover the track geometry. For slab tracks on the other side large alterations in track position can only be made possible by substantial amounts of work.

Railway constructions are exposed to dynamic loading from the interaction between vehicle and track. These dynamic effects are related to the train speed and resonance may occur if the train speed approaches the so called critical speed of the railway system. The critical speed depends on a combination of the track and soil properties. The stiffness of the track as well as the stiffness of the embankment and the subsoil are important to attain a high critical speed.

Ten persons with different backgrounds have been interviewed and their answers have been put together. Some of the interviewees points out special circumstances in the high-speed project because of the decision to use a slab track. There are challenges in preventing settlements and another challenge is that it is a new construction technique for us in Sweden. To estimate the settlements in the embankment and subgrade the interviewees seem to agree that a FEM-software intended for geotechnical analysis is the best alternative. The software should provide customized material models to make the analysis easier. Examples of software that are mentioned are Plaxis, Zsoil, Comsol Multiphysics and the FDM-software Flac. One of the interviewees also suggests the software Particle Flow Code (PFC) which uses the distinct element method.

Concerning the dynamic effects most of the interviewees reckon that a dynamic analysis mainly (or only) aims to consider the risk for resonance i.e. that the train speed reaches the critical speed of the railway and subgrade. They would prefer that the dynamic analysis was conducted as linear elastic calculations. Some of the interviewees describe that it is possible to do geotechnical, non-linear, dynamic simulations but that those are complicated

and the knowledge and experience of such simulations are limited. Dynamic analysis and settlement analysis are considered to be two separate simulations. There is also an uncertainty about to what extent it will be necessary to consider the dynamic effects.

For dynamic calculation FEM-programs are also considered to be the best alternative. In the interviews some think that the best choice of software to a large extent depends on the skills and preference of the engineer performing the calculations. Many of the interviewees assumes that the dynamic analysis will be linear elastic calculations and it is primarily general-purposed FEM-software that have been discussed for that purpose.

To validate the settlement calculations as well as the dynamic analysis many of the interviewees consider full scale tests to be the best alternative and to construct a mockup to be good option in the high-speed train project.

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Världens första höghastighetsbana byggdes mellan Tokyo och Osaka år 1964. Sedan dess har flera andra länder, framförallt i Asien och Europa, också infört höghastighetståg. Europeiska exempel på länder som har tåg med hög hastighet är Frankrike, Spanien, Tyskland, Italien och Nederländerna. Järnvägarnas internationella samarbetsorganisation, UIC, definierar höghastighet som tåg som går i minst 250 km/h, vilket även är den svenska klassificeringen (Lennefors, 2010).

I december 2008 tillsattes Gunnar Malm av regeringen för att utreda förutsättningarna för utbyggnad av höghastighetsbanor i Sverige (Lennefors, 2010). I dagsläget pågår utredningar för utbyggnad av ny höghastighetsjärnväg här för fullt. Järnvägen planeras gå mellan Stockholm och Göteborg samt mellan Stockholm och Malmö. Banan kommer att trafikeras av höghastighetståg med hastigheter på 320 km/h samt storregionala tåg, med fler uppehåll, som ska hålla en hastighet runt 250 km/h (Lennefors, 2016). Sträckan Stockholm-Göteborg planeras ta 2 timmar med höghastighetståget och sträckan Stockholm-Malmö 2,5 timmar. Syftet med projektet är att öka tillgängligheten till några av Sveriges största städer för att få större arbetsmarknadsregioner (Eriksson & Lennefors, 2015).

Det finns olika tekniker som kan tillämpas vid byggande av höghastighetsspår. Järnvägen kan grundläggas antingen på bank eller på så kallad landbro och överbyggnaden kan utformas som antingen ballastspår eller fixerat spår (Luleå tekniska högskola, 2015). Fixerade spår är den vanligaste lösningen för höghastighetsbanor och det förekommer i stor omfattning i bland annat Tyskland, Holland, Japan, Kina och Taiwan (Andréasson, 2010). Det finns dock även exempel på ballastspår som trafikeras i hastigheter upp till 350 km/h i Frankrike och Spanien (Luleå tekniska högskola, 2015). I Sverige är det nu klart att höghastighetsjärnvägen ska gå på bank och utformas med fixerade spår (Karlsson, 2014). Att bygga på bank är en väl beprövad metod i Sverige som det finns god erfarenhet av (Luleå tekniska högskola, 2015). Enligt ”Teknisk systemstandard för höghastighetsbanor” ska permanenta geokonstruktioner i underbyggnad och undergrund dimensioneras för tåghastighet 320 km/h och för en största axellast på 25 ton (Karlsson, 2014).

I arbetet med den svenska höghastighetsjärnvägen ställs nu frågan hur deformationer i bank och undergrund bör beräknas. Det råder en osäkerhet kring vilken beräkningsmodell och vilka programvaror som är lämpliga att använda för dessa beräkningar samt vilka förenklingar som går att göra. Det är också oklart hur stor inverkan dynamiska påkänningar från tågtrafiken har och i vilken utsträckning dessa behöver beaktas. Enligt Luleå tekniska högskola (2015) bortser man från dessa dynamiska laster för järnvägar med konventionell hastighet men det är inte fullt utrett vilken betydelse dynamiken får vid högre hastigheter.

1.2 Syfte

Syftet med examensarbetet är att göra en inventering av befintliga programvaror för beräkning av deformationer hos bankfyllnad och undergrund samt att utreda vilka programvaror som är lämpligast att använda vid arbetet med höghastighetsbanor. Det ska även utredas i vilken utsträckning dynamiska effekter bör beaktas och vad dynamiska beräkningsprogram kan tillföra.

1.2.1 Frågeställningar

Följande frågeställningar kommer att diskuteras i arbetet:

- Vilka befintliga programvaror kan vara lämpliga att använda sig av för sättningsberäkningar i arbetet med höghastighetsbanorna?
- Vid vilken bankhöjd går det att bortse från inverkan av dynamisk last?
- Vad kan dynamiska programvaror tillföra?
- Hur kan beräkningarna valideras?

1.3 Avgränsningar

Detta examensarbete sammanställer uppfattningar om vilka programvaror som kan användas för sättningsberäkningar och dynamiska analyser och vilka antaganden som bör göras i arbetet med höghastighetsbanorna. Inga egna beräkningar har genomförts utan arbetet syftar till att sammanställa uppfattningar och åsikter från personer i branschen på ett relativt övergripande plan.

Det här arbetet behandlar beräkningsprogram och modeller för mark och bank samt hur dynamiska effekter bör analyseras. Det behandlar inte beräkningar för själva spårkonstruktionen och beaktar inte heller fall som järnväg på bro eller i tunnel. Svårigheterna i övergångszoner beaktas inte heller specifikt. De dynamiska effekterna behandlas ut ett sättnings- och bärighetsperspektiv, även här för bank och undergrund. Rapporten avser alltså inte omgivningsvibrationer och omgivningspåverkan.

1.4 Rapportens disposition

Här presenteras rapportens disposition med en övergripande beskrivning av innehållet och upplägget i respektive kapitel.

Kapitel 1: Inledning - Bakgrund till examensarbetet presenteras samt dess syfte, frågeställningar och avgränsningar.

Kapitel 2: Metod – Här beskrivs metoden med intervjuer som har använts för att få fram resultaten som det här examensarbetet bygger på. Intervjumetodiken beskrivs och det förklaras hur intervjuerna har genomförts. En kort beskrivning av vilka som intervjuats och hur intervju svaren redovisas presenteras också.

Kapitel 3: Teori – Här presenteras resultatet från litteraturstudien som beskriver järnvägsutformning, fixerade spår, dynamiska effekter och olika programvaror.

Kapitel 4: Resultat och analys – I detta kapitel presenteras resultatet från intervjuerna. Svaren från intervjuerna har tolkats och delats in i kategorier. De presenteras under fem huvudrubriker vilka är: *Förutsättningar*, *Programvaror för sättningsberäkningar*, *Dynamiska effekter*, *Dynamiska programvaror* samt *Validering*.

Kapitel 5: Diskussion och slutsatser – de viktigaste resultaten analyseras utifrån examensarbetets frågeställningar och den använda metoden diskuteras. De slutsatser som går att dra utifrån resultatet presenteras i punktform och det ges förslag på vidare arbete.

2 Metod

2.1 Litteraturstudie

Arbetet inleddes med en litteraturstudie där såväl grundläggande litteratur som mer applicerade artiklar och rapporter använts. Litteraturstudien ligger till grund för kapitel 3 som beskriver relevant teori och har även haft som syfte att skapa ett underlag till intervjuerna som genomförts. Områden som järnvägsutformning, fixerade spår och dynamiska effekter har studerats. Det har även gjorts en inventering av befintliga programvaror.

2.2 Intervjumetodiken

En intervju är en process i vilken intervjuaren och intervjupersonen tillsammans producerar kunskap. Det är ett samtal som följer en förbestämd struktur och som har ett definierat syfte (Brinkmann & Kvale, 2015). Intervjuer kan vara antingen kvalitativa eller kvantitativa. Kvalitativa metoder syftar till att karaktärisera något, att systematisera kunskap. Kvantitet beskriver mängden av denna karaktär eller egenskap (Olsson & Sörensen, 2011).

Enligt Olsson och Sörensen (2011) är den *kvalitativa* forskningsintervjun ett ”ämnesinriktat samtal där två personer talar om samma ämne som de båda har intresse av”. Olsson och Sörensen (2011) beskriver att intervjun strävar efter att beskriva och förstå det centrala i den intervjuades tolkningar av temat och försöker samla in så rika och förutsättningslösa beskrivningar som möjligt. Öppenhet och lyhördhet är av stor betydelse och det är viktigt att få en så exakt bild som möjligt av vad den intervjuade vill förmedla. Intervjuaren ska inte överföra sina egna tankar och idéer till den person som intervjuas (Olsson & Sörensen, 2011).

Intervjuer kan ha olika grad av standardisering och olika grad av strukturering vilket också beskrivs i Olsson & Sörensen (2011). I en standardiserad intervju ställs frågorna i en bestämd ordning och med samma ordalydelse till alla intervjupersonerna och de får svara utifrån fasta svarsalternativ. Intervjuaren har ingen möjlighet att variera intervjun från en intervjuperson till en annan. Struktureringsgraden avgör hur frågorna kan uppfattas av den intervjuade. Med en hög strukturingsgrad är frågorna formulerade på ett sådant sätt att de kommer att uppfattas likartat av alla intervjupersonerna. Extremfallet skulle vara en muntlig enkätundersökning med svarsalternativ. En lägre strukturingsgrad innebär öppnare frågor som den intervjuade kan tolka mer fritt vilket ökar möjligheten att få fram nya tankar som kan utebli vid en hög strukturingsgrad. De flesta intervjuer hamnar någonstans där emellan (Olsson & Sörensen, 2011).

Intervjuer som är utforskande är vanligen mer öppna vad gäller frågor och har endast en övergripande planering av strukturen. Intervjuaren presenterar ett ämne eller en frågeställning och tolkar sedan svaren och söker nya vinklar och ny information. Om intervjun istället testat en hypotes tenderar att vara mer strukturerade och planerade (Brinkmann & Kvale, 2015).

2.3 Hur intervjuerna har genomförts

I det här examensarbetet har en kvalitativ intervjustudie genomförts för att samla in information och sammanställa olika uppfattningar. Intervjuerna som genomförts har haft en låg standardiseringsgrad och varit av en devis strukturerad modell med förberedda områden att diskutera och frågor att ta upp. Vad som främst har diskuterats i intervjuerna har dock varierat från gång till gång beroende av intervjupersonernas huvudsakliga kunskapsområde.

De flesta av intervjuerna har genomförts via telefon eller Skype, någon har genomförts i person. Inför intervjuerna har intervjupersonerna tagit del av information om examensarbetets inriktning och frågeställningar, se Bilaga A. Intervjupersonerna utgörs av personer som på olika sätt arbetar i branschen och de har oftast haft någon koppling till höghastighetsprojektet. De har valts ut på grund av deras forskning eller arbets- och kunskapsområden som på olika sätt varit relevanta för examensarbetets frågeställningar.

Intervjuerna har utgjort en explorativ undersökning för att öka kännedomen om problemområden kopplade till examensarbetets frågeställningar och för att skapa en helhetsbild. Det anses därför inte vara av någon större betydelse vem av intervjupersonerna som har sagt vad, det viktiga har varit att beskriva kunskapsläget och olika uppfattningar. I redovisningen av intervjuerna framgår det därför inte vilka kommentarer som hör till vilken intervjuperson utan bara vad som framkommit.

Intervjufrågorna har till viss del följt en förutbestämd struktur och har varit av en öppen karaktär. Utifrån svaren har dock följdfrågor och den huvudsakliga inriktningen varierat. I Bilaga B ges exempel på intervjufrågor som diskuterats. Intervjuerna har genomförts under mars och fram till första veckan i april 2017 och beskriver kunskapsläget vid den tidpunkten.

2.4 Presentation av de intervjuade

Sammanlagt har tio personer intervjuats.

- Två personer från Trafikverket
- Fyra personer från olika konsultföretag
- En person från Statens geotekniska institut
- Tre personer från olika högskolor

De arbetar med geoteknik/geokonstruktioner, brokonstruktion, spårkonstruktioner, strukturmekanik med mera och de flesta har på något sätt varit involverade i höghastighetsprojektet. Några har även arbetat med dynamiska analyser av konstruktioner, geokonstruktioner, spårkonstruktioner eller i geotekniska sammanhang.

2.5 Redovisning av intervjuer

Svaren från intervjuerna har delats in och sammanställts under utarbetade rubriker. En tolkning av intervjuerna presenteras tillsammans med utvalda citat för att illustrera uppfattningarna som kommit fram. De beskrivningar som presenteras i resultatet är endast hämtade från intervjuerna och bygger alltså inte på annan litteratur eller liknande. Först presenteras de förutsättningar i höghastighetsprojektet som intervjupersonerna har beskrivit och velat lyfta. Därefter följer rubrikerna rapportens frågeställningar enligt följande:

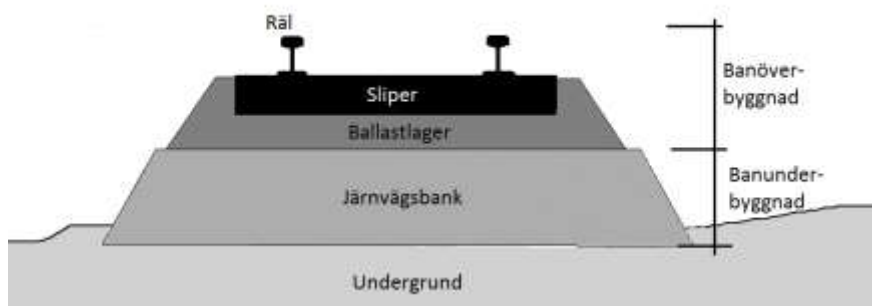
- **Förutsättningar:** Här presenteras de förutsättningar som intervjupersonerna har lyft angående arbetet med höghastighetsbanorna vad gäller utformning och krav.
- **Programvaror för sättningsberäkningar:** Här diskuteras vilken typ av modell som krävs och vilka programvaror som kan vara lämpliga för geotekniska beräkningar, främst med avseende på sättningar.
- **Dynamiska effekter:** De dynamiska effekterna och deras betydelse diskuteras samt hur dessa bör behandlas. Inverkan av bankhöjden är endast en del av det som kommit att diskuteras. Det diskuteras till viss del hur dynamiska analyser bör genomföras vilket anknyter till nästa avsnitt om dynamiska programvaror.
- **Dynamiska programvaror:** Här diskuteras vilka programvaror som kan vara lämpliga att använda för att utföra dynamiska analyser och några tankar angående modelleringen.
- **Validering:** Här sammanställs de tankar som dykt upp i intervjuerna kring hur beräkningarna för höghastighetsbanorna kan/bör valideras.

3 Teori

3.1 Järnvägsteknik

3.1.1 Ballastspår

Den vanligaste typen av järnvägsspår i Sverige är så kallat ballastburet spår. Dessa spår är uppbyggda av flera olika delar såsom undergrunden, banunderbyggnaden och banöverbyggnaden, se Figur 1. Dessa bär upp och sprider lasten från tågtrafiken och från banans egetyngd. Till järnvägsbanan hör också elkraftförsörjningsanläggningarna, kontaktledningarna, signalsystemen och telekommunikationsanläggningarna, dessa kommer dock inte att behandlas i den här rapporten (Bårström & Granbom, 2012).



Figur 1 Principskiss över delarna i ett ballastspår

3.1.1.1 Undergrunden

Undergrunden är det geologiska underlag som banan vilar på eller går genom. Den behöver kunna ta emot lasten från banans egetyngd såväl som de krafter som tågtrafiken ger upphov till. Det krävs också tillräcklig bärighet och stabilitet så att det inte uppstår problem med sättningar och skred. Undergrunden har även som uppgift att motverka froströrelser och dämpa vibrationer från tågtrafiken så att dessa inte sprider sig till omgivningen. Den måste också kunna dränera bort vatten från den överliggande ballastbädden (Bårström & Granbom, 2012).

Material som lämpar sig bra i undergrunden är enligt Bårström & Granblom (2012) främst friktionsjordar som grus, sand och morän eller berg. Om undergrunden istället utgörs av kohesionsjordar, som lera och silt, är det mer problematiskt då dessa har låg hållfasthet och därför både är känsliga för skred och är sättningsbenägna. De kan också vara mycket frostkänsliga och framförallt leror sprider vibrationer över stora områden (Bårström & Granbom, 2012).

Ifall undergrundens bärförmåga är bristfällig kommer det till slut att ge upphov till plastiska deformationer. Om den befintliga undergrunden inte har en tillräcklig bärighet

behöver den därför förstärkas eller dräneras. Det kan åstadkommas med ett dränerande dike, genom att mekaniskt packa materialet bättre eller genom att kemisk stabilisera marken (Esveld, 2001). Den vanligaste förstärkningsmetoden för järnvägsbankar är kalkcementpelare som injekteras i jorden för att hålla emot skred och minska sättningarna. Om det förekommer organiska jordar som torv, dy eller gytta är det vanligaste att dessa grävs bort och ersätts med friktionsmaterial (Bårström & Granbom, 2012).

3.1.1.2 *Banunderbyggnaden*

Hela följande stycke om banunderbyggnaden är baserat på beskrivningar från (Bårström & Granbom, 2012).

Banunderbyggnaden kan utgöras av anläggningar eller byggnadsverk som ger banan dess läge och form. Vanligast är att den byggs upp av jordmaterial eller berg som bildar bankar eller skärningar i landskapet, men även broar och tunnlar räknas till banunderbyggnader. Deras uppgift är att ta upp och fördela lasten från tågtrafiken och banöverbyggnaden ner i undergrunden så att påkänningarna inte blir för stora någonstans. Det finns både mer elastiska och mer stumma banunderbyggnader. Bankar av friktionsmaterial eller bergkross är något elastiska vilket är önskvärt eftersom det minskar vibrationerna från tågen. Tunnlar och skärningar i berg ger däremot en stum botten (Bårström & Granbom, 2012).

Underbyggnadens översta lager kallas för underballast. Lagret är 1–2 meter tjockt och utgörs vanligtvis av krossat berg eller annat frostbeständigt material. Underballasten ger banunderbyggnaden sin önskvärda elasticitet. Lagrets tjocklek avgörs av bärlighetskraven på banan och väderförhållandena med avseende på köld och frost. För att vatten inte ska kunna stiga kapillärt i underballasten förhindras normalt att finkornigt material tränger upp i materialet med en geotextil. När bankarna är högre än 1–2 meter, då det krävs material utöver underballasten, måste det vara material som inte är alltför frostaktivt och som har en tillräcklig hållfasthet. Även här är krossat berg lämpligt (Bårström & Granbom, 2012).

3.1.1.3 *Banöverbyggnaden*

Det översta ballastlagret tillsammans med sliprar och räler kallas för banöverbyggnad. Ballasten tar upp krafterna från spåret och fördelar dessa ner till underballasten och vidare. Fixerade/ballastfria spår saknar ballast och där är rälerarna istället fästa i betongplattor eller liknande (Bårström & Granbom, 2012). Denna typ av spår beskrivs mer ingående i nästa avsnitt.

Ballasten i överbyggnaden består av makadam eller grus. Den måste ha ett så pass stort tryck mot sliprarna att dessa inte flyttar på sig under belastning av tågtrafik. Det krävs en stor inre friktion mellan kornen och de får inte krossas för lätt av spårens rörelse. Bäst som ballastmaterial är skarpkantad makadam av bergarter med hög hållfasthet. Liksom för underballasten ska överbyggnadens ballastlager vara något elastiskt och fritt från finkornigt material och även här beror lagrets tjocklek på de gällande bärlighetskraven (Bårström & Granbom, 2012).

Den översta delen i systemet är spåret som består av längsgående räler upplagda på och fästa vid tvärgående sliprar, se Figur 2. Sliprarna för ner krafterna från rälerorna till ballasten och fixerar rälerorna i sidled så att spårvidden hålls konstant. Moderna sliprar är tillverkade av spännarmerad betong och deras tyngd tillsammans med hårt fastklämda räler ger sidostabiliteten. Spårets bärförmåga beror av rälerornas böjstyvhet samt avståndet mellan sliprarna. Det är i viss mån möjligt att justera spårets läge i ballasten (Bårström & Granbom, 2012). Lasten fördelas från räl till sliper till ballast på ett sådant sätt så att spänningen minskar för varje nivå. Den största spänningen förekommer mellan hjul och räl där den är i storleksordningen 300 MPa, sedan avtar spänningen längre ner i konstruktionen tills den i undergrunden endast motsvarar ca 0,05 MPa (Esveld, 2001).



Figur 2 Ballastspår med sliprar och räl (Esveld, 2001)

3.1.2 Fixerat spår

Utvecklingen av fixerade spår, även kallat ballastfria spår eller ”slab track”, har pågått i några decennier. Det användes till en början främst i tunnlar men har senare även till stor del kommit att omfatta höghastighetsjärnväg. Till en början innebar det att slipers fortfarande användes men att ballasten i överbyggnaden byttes ut mot betong eller asfalt. Allt eftersom har olika designer tillkommit med sliperorna inbyggda i betongen eller rälen direkt ingjuten i betongen/asfalten (Gautier, 2015). Dessa plattor av betong eller asfalt är mycket styva vilket innebär att den önskvärda elasticiteten måste uppnås på något annat sätt, vanligtvis genom att lägga in elastiska element under räl eller sliper (Lichtberger, 2011).

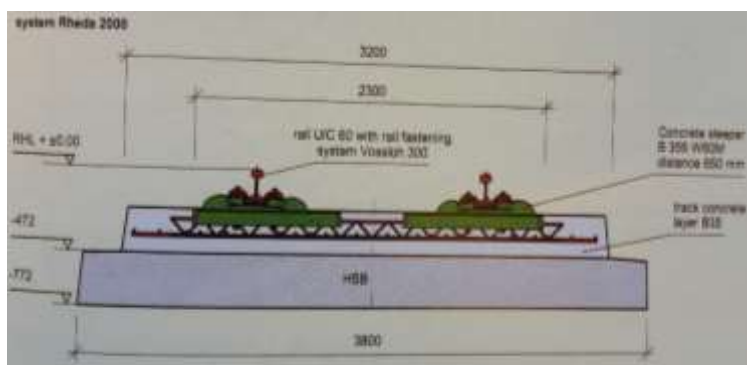
Enligt Andréasson (2010) är Rheda 2000, FF Bögl och Shinkansen ”frame-track” de dominerande systemen för fixerade spår. Deras utformning presenteras övergripande nedan för att ge några exempel på utformning av fixerade spår.

3.1.2.1 Rheda 2000

Rheda 2000 tillhör de system som är uppbyggda av slipers ingjutna i betong där rälen fästs i dessa sliprar. Det första Rheda 2000-systemet installerades år 2000 på en sträcka för höghastighetståg i Tyskland. Systemet är en vidareutveckling av det tyska Rhedasystemet. Till en början bestod systemet av hela slipers, kallade monoblocks, som gjöts in i armerade betongtråg. I utvecklingen av Rheda 2000 byttes detta monoblock ut mot två "twinblocks" där vardera räl fästes i fästpunkten i vardera twinblock, se Figur 2 och Figur 4.

Utformningen av dessa fästpunkter säkerställer att rälen hamnar i exakt rätt position.

Twinblock-sliprarna kopplas parvis ihop med longitudinell fackverksarmering som gjuts in i betongen vilket stabilt fäster sliprarna i den gjutna betongen (Esveld, 2001).



Figur 3 Twinblocks med fackverksarmering i betongsliper (Esveld, 2001)



Figur 4 Twinblock med fackverksarmering (Esveld, 2001)

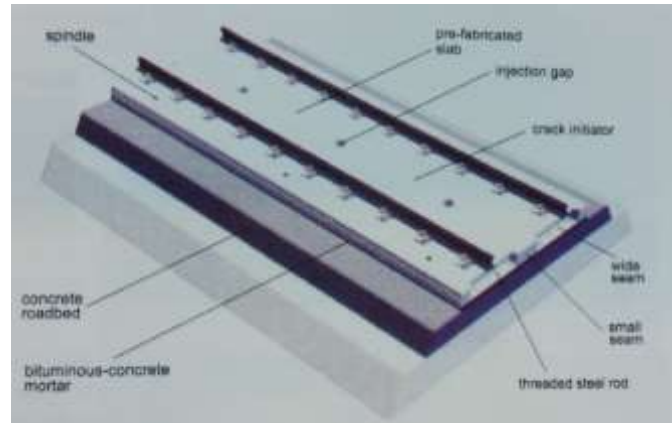
Spåret installeras uppifrån och ner. Ovan- och innersidan av rälen används som referenser så att spåret hamnar i rätt läge. Med hjälp av spindlar justeras spårets läge i byggskedet och slipers och räl placeras i rätt position innan de på plats gjuts in i betong (Esveld, 2001).

I Rheda 2000 systemet är armeringen placerad mitten av betongplattan för att begränsa sprickbildningen och för att ta upp horisontella krafter. Armeringen verkar inte för att göra plattan styv vilket gör att systemet kräver en i princip sättningfri konstruktion (Esveld, 2001).

3.1.2.2 FF Bögl

FF Bögl är ett av de prefabricerade systemen som används. De fungerar så att prefabricerade betongplattor med infäst räl monteras i fält på en banvall helt i betong eller med ett översta lager av asfalt/betong. Den prefabricerade betongplattan i Bögl system är 20 cm tjock, 6,45 m lång och 2,55 eller 2,80 m bred. Plattan är armerad både längs med och tvärs över. Armeringen tvärs över är dessutom förspänd, utformningen visas i Figur 5 nedan (Esveld, 2001).

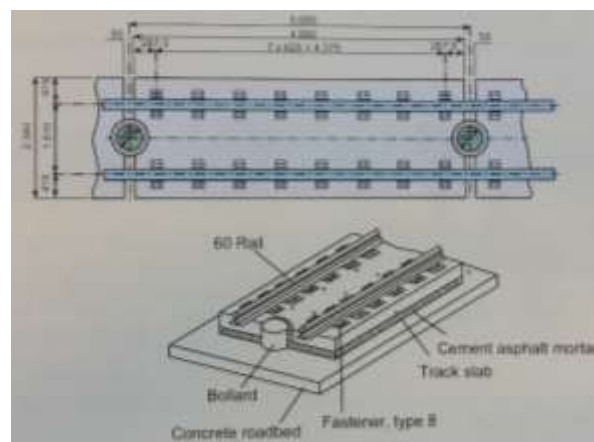
Vid montering placeras betongplattorna på banvallen och de olika plattorna kopplas löst ihop med den longitudinella armeringen som sticker ut på kortsidorna. Sedan justeras plattans läge med hjälp av inbyggda spindlar så att rälen hamnar i rätt position. Väl där injekteras ett cementmurbruk under plattorna och fäster plattorna i banvallen. Slutligen sammanfogas de olika plattorna med betong till en sammanhängande stel platta (Esveld, 2001).



Figur 5 FF Bögl-system (Esveld, 2001)

3.1.2.3 Shinkansen

Shinkansen är också ett prefabricerat system som till stor del liknar FF Bögl med prefabricerade betongplattor med infäst räil. Det placeras och fästs ovanpå en banvall av betong eller asfaltbetong. De främsta skillnaderna mellan systemen är måtten, betongplattorna i Shinkansensystemet har måtten 4,93m x 2,34 m x 0,19 m, och att det för



Figur 6 Shinkansensystem med cylindriska betongstavar (Esveld, 2001)

Shinkansensystemet tillkommer cylindriska betongstavar ("bollards") i plattornas ändar som förhindrar förflyttning i sidled och längsmed spåret, dessa "bollards" visas i Figur 6 (Esveld, 2001).

3.1.2.4 För- och nackdelar med fixerade spår

Esveld (2001) anger att jämfört med ballastspår ger fixerade spår en betydligt större stabilitet vilket gör att deformationer av spåret blir mindre till storleken och mindre förekommande, förutsatt en god grundläggning. Det ger en god och beständig spårgeometri vilket förbättrar komforten för passagerare och minskar behovet av underhåll. Just det låga underhållsbehovet ses som en fördel vid jämförelse med ballastspår. I ballastspår krossas

ballasten vid höga hastigheter vilket både kan skada tåghjul och räl samt ge ett tillskott av finmaterial. Det gör det nödvändigt med regelbundet underhåll av ballastspår. Det lägre underhållsbehovet för fixerade spår ger en lägre underhållskostnad och mindre kostnader kopplat till störningar av tågtrafiken. Andra fördelar med fixerade spår är att de ger en lägre och lättare konstruktion med en längre livstid (Esveld, 2001). Enligt Andréasson (2010) är livslängden för ett ballastspår normalt runt 40 år medan den för ett ballastfritt spår beräknas ligga på upp mot 120 år.

Några av de nackdelar som finns med fixerade spår är att de är mycket dyrare att anlägga, att större ändringar av spårets position kräver omfattande arbete och att dess förmåga att anpassa sig till uppkomna sättningar är relativt liten (Esveld, 2001). Oavsett vilket system för fixerat spår som används krävs att det praktiskt taget inte uppkommer några sättningar. För ballastspår kan lokala sättningar kompenseras för genom att tillföra ballast så att spårgeometrin återställs (Gautier, 2015). För fixerade spår däremot ställs högre krav eftersom möjligheten att justera konstruktionens geometri i efterhand är begränsad. Stort fokus hamnar därför på att få en stabil järnvägsbank och undergrund. Detta kräver utförliga geotekniska undersökningar och ofta omfattanden markarbeten och bärighetsförbättrande åtgärder, vilket är både dyrt och tidskrävande (Esveld, 2001). För utformningar med fixerade spår har det också uppstått problem med ojämna deformationer i övergångszonerna där spårplattorna övergår till traditionellt ballastspår, eller annan konstruktion, vilket blir problematiskt. Slutligen är bullernivån högre för fixerade spår än för ballastspår (Luleå tekniska högskola, 2015).

3.1.3 Järnväg på bank

Att anlägga en järnväg på bank kräver mer utrymme än alternativet att anlägga hela sträckan på landbro. Bankarnas släntlutning får inte vara brantare än 1:1,5–1:2 vilket innebär att om banken är hög kommer den att ta upp en stor yta och kräva stora mängder bankmaterial. Eftersom massbalans eftersträvas ska massorna som används i banken gärna komma från skärningar, ifall dessa massor är av lämplig kvalitet. Exempel på bra fyllnadsmaterial från skärningar är sprängmassor från schakt eller tunnlar och grovkorniga jordar. Om materialet i undergrunden är av sämre kvalitet kan det vara nödvändigt att gräva ur det och ersätta det med lämpligare material innan det att banken anläggs (Luleå tekniska högskola, 2015).

3.2 Teknisk systemstandard för höghastighetsbanor (TSS)

Följande information är hämtad från samma kravdokument som den beskriver, nämligen "Tekniska systemstandard för höghastighetsbanor" av Robert Karlsson. Dokumentet "Teknisk systemstandard för höghastighetsbanor", TSS, är ett trafikverksdokument som innehåller trafikverkets tekniska krav vid utformning, konstruktion, besiktning och underhåll av höghastighetsjärnväg. Det beskriver de tekniska krav som ska uppfyllas för att nå de uppsatta målen med höghastighetsbanan. Där redogörs även för en del viktiga kriterier som ska uppfyllas för att möjliggöra den funktion som standarden beskriver, bland annat att banan ska utformas med ett fixerat spårssystem. Reglerna i dokumentet ska tillämpas av projektledare, trafikingenjörer och annan berörd personal, såväl som av konsulter med motsvarande arbete (Karlsson, 2014).

3.3 Den dynamiska lastens effekter

Dynamiska effekterna påverkas av samverkan mellan last och konstruktion. Hur lasten varierar med tiden och på vilket sätt det sker avgör lastens karaktär. En konstruktions dynamiska egenskaper påverkas av dess massa, dämpning och styvhet vilket tillsammans ger konstruktionens naturliga frekvens som den helst vibrerar i. Om lasten som påverkar konstruktionen består av frekvenser som motsvarar konstruktionens naturliga frekvens så kommer ett resonansfenomen att uppstå då svängningar förstärks (Esveld, 2001).

För järnvägskonstruktioner ger tågtrafiken upphov till dynamiska krafter som uppstår vid hjulens kontakt med rälen på grund av mindre ojämnheter (Bårström & Granbom, 2012). Dessa dynamiska krafter är hastighetsberoende och när tåghastigheten ökar bli de dynamiska påkänningarna relevanta för alla typer av jordmaterial. Tryckspänningarna kan öka med så mycket som 50 % när tåghastigheten ökar från 100 km/h till 300 km/h (Lichtberger, 2011).

3.3.1 Höghastighetsfenomenet

Längs en markyta utbreder sig energi vanligen som Rayleighvågor/ytvågor som fortplantar sig med Rayleighvågshastigheten. Om en last på homogen mark rör sig med en hastighet som närmar sig jordens Rayleighvågshastighet kan ett resonansfenomen uppstå. För tåg på spår riskerar resonansfenomenet (höghastighetsfenomenet) att uppkomma ifall tåget närmar sig en så kallad ”kritisk hastighet”. Den kritiska hastigheten beror på en kombination av spårets och jordens egenskaper. Styvheten hos såväl spåret som banken och den underliggande jorden är viktiga för att uppnå en hög kritisk hastighet.

Om undergrunden är styv är det spårets och bankens egenskaper som avgör den kritiska hastigheten, vilken då oftast ligger långt över aktuell tåghastighet. Om undergrunden istället är lös och tåghastigheten hög föreligger en risk att den kritiska hastigheten närmas eller överskrids (Wersäll & Larsson , 2015). Ifall höghastighetsfenomenet uppkommer fås en kraftig förstärkning av vågrörelserna vilket ger kraftigt förstärkta spårrörelser och omgivningsvibrationer. Detta inträffar främst för bankroppar på jord med låg styvhet, och därmed låg vågutbredningshastighet, såsom lera, gyttja, torv och liknande (Andréasson, 2010). Det är mycket viktigt att det undviks då det kan leda till kraftiga förskjutningar av spåret vilket i sin tur kan leda till urspårning (Wersäll & Larsson , 2015).

Enligt Lichtberger (2011) finns det för varje jordmaterial ett kritiskt värde för vibrationernas vågutbredningshastighet i marken, v_{crit} . För hårda och väl packade material är denna högre än för lösare material. För känsligare jordar bör kvoten dynamisk last/statisk last vara så liten som möjligt. Följande krav ska mötas enligt Lichtberger (2011):

$$v_{eff} < v_{crit} \quad \text{ekv 1}$$

$$\sigma_{dyn} < k \cdot \sigma_{stat} \quad \text{ekv 2}$$

där

v_{eff} = uppmätt vågutbredningshastighet för vibrationerna

v_{crit} = kritisk vågutbredningshastighet

k = konstant som beskriver jorden känslighet, låga värden för känsliga jordar

σ_{dyn} = dynamiska spänningar
 σ_{stat} = statiska spänningar
(Lichtberger, 2011)

Vågutbredningshastigheten i marken uppskattas öka proportionellt mot markens styvhet i kvadrat vilket innebär att en bana för 400 km/h kräver en fyra gånger högre styvhet i undergrunden än en bana för 200 km/h för att höghastighetsfenomenet inte ska uppstå. För tåghastigheter på 400 km/h skulle det krävas en skjuvhållfasthet i undergrunden på 50-70 kPa för att uppnå en tillräckligt hög skjuvvågshastighet. Följaktligen bedöms i princip alla förekommande leror kräva speciella åtgärder såsom jordförstärkning eller att de byggs över med bro vid högre hastigheter. Höghastighetsfenomenet gör att mark som inte hade krävt någon förstärkning vid 200–250 km/h kräver omfattande förstärkning vid hastigheter upp mot 400 km/h (Andréasson, 2010). När ett jordmaterial ska motstå dynamiska krafter är det fördelaktigt med heterogena kornstorlekar, en stark struktur och hög konsolideringsgrad (Lichtberger, 2011).

För att undvika att det här resonansfenomenet uppkommer bör spårets styvhet maximeras, med en hög styvhet till ett stort djup. Det räcker alltså inte att förstyya enbart banken utan underliggande jordlagers styvhet är också av betydelse, vid lösa jordlager kan pådäck eller bro vara alternativ (Wersäll & Larsson, 2015).

3.3.2 Omgivningsvibrationer

Själva spårområdet kommer förstärkas för att uppnå en tillräcklig styvhet så att höghastighetsfenomenet undviks. Marken vid sidan av spårområdet kommer däremot på många håll att vara oförstärkt. På sträckor genom områden med till exempel silt och lera är det troligt att tåghastigheten överstiger markens vågutbredningshastighet och att höghastighetsfenomenet då uppstår. Förstärkningen av spåret dämpar dessa effekter till viss del. I ett område med styvare undergrund, där vågutbredningshastigheten överstiger tåghastigheten, blir omgivningsvibrationerna mycket begränsade. I det direkta sidoområdet (ca 15 m från spåret) kommer vibrationer dock att kännas av på grund av den elastiska deformationsutbredning som följer tåget (Andréasson, 2010).

3.4 Sättningskrav

För fixerade spår är kraven på undergrunden i allmänhet väldigt strikta (Esveld, 2001). Ifall det uppkommer lokala sättningar i ballastspår går det att kompensera för dessa genom att fylla på med ballast så att spårgeometrin återställs. För fixerade spår däremot utgör sättningar ett centralt problem som måste hanteras under konstruktionens hela livslängd. Betongplattorna som utgör det fixerade spåret är vanligtvis inte armerade för att klara böjning längs med plattorna. Detta innebär att det ställs höga krav på undergrunden och grundläggningen av järnvägsstrukturen (Gautier, 2015).

I kraven från Trafikverket (2014) anges maximalt tillåtna totalsättning respektive maximal sättningsskillnad i längs- och tvärlängd för ballastspår. För ballastfria spår anges däremot att sättningskraven ska bestämmas för varje enskilt fall. I TSS (Karlsson, 2014) anges att dimensionerande sättningar ska beräknas för en dimensioneringsperiod av 80 år och att hänsyn ska tas till sättningar både i undergrund och i underbyggnad. Där anges också att ”noll dimensionerande konsolideringssättningar får förekomma i oförstärkt eller förstärkt undergrund efter anläggningstiden”.

För trafik i konventionell hastighet beaktas inte trafiklasterna i sättningsberäkningarna. För banor med högre hastighet, där krafterna blir större, är det däremot inte fullt utrett i hur stor utsträckning trafiklasten påverkar (Luleå tekniska högskola, 2015). Enligt Gautier (2015) bör dynamiska beräkningar utföras för att undersöka ifall förstärkning av sättningar kan uppkomma på grund av resonansfenomenet, med det finns ännu ingen standardisering för hur dessa bör utföras.

3.5 Grundläggningsmetoder

Andréasson (2010) anger att i projektet med höghastighetsjärnvägen är det på grund av det hårda kravet gällande horisontalradier svårt att undvika lokala områden med mycket dåliga markförhållanden. Banan kommer tvunget att gå igenom både områden med lera och med torv. För att det ska vara möjligt att anlägga höghastighetsjärnväg på undergrund av material som lera, torv, lös silt och löst lagrad friktionsjord krävs någon form av grundförstärkning. Andréasson (2010) delar in grundförstärkningsalternativen i tre kategorier:

- Utskiftning av jordmaterial (speciellt torv och gyttja) d.v.s. urgrävning/återfyllnad
- Förstärkning av befintligt jordmaterial, exempelvis genom inblandning av kalk/cement (för lera och silt) eller genom packning (för löst lagrad friktionsjord)
- Grundläggning av bana på bankpålar, påldäck eller bro

Markens styvhet efter förstärkning är av stort intresse för att utvärdera risken för att höghastighetsfenomenet uppstår (Andréasson, 2010). Nedan beskrivs några förstärkningsmetoder från de tre kategorierna ovan.

3.5.1 Utskiftning

Utskiftning innebär att material av dålig kvalitet grävs ur och ersätts med ett fast material, gärna sprängsten eller alternativt något annat friktionsmaterial. Metoden tillämpas främst vid förekomst av torv eller liknande material som behöver bytas ut för att få tillräcklig stabilitet och begränsa sättningarna. Det hindrar också att höghastighetsfenomenet uppstår eftersom materialet som ersätter torven har tillräckligt hög styvhet. Oftast har sådana här torvlager en mäktighet på bara några meter. Under torven ligger i många fall en lös lera som också grävs ut om mäktigheten är begränsad, eller annars förstärks (Andréasson, 2010).

3.5.2 Packning

Vid förekomst av löst lagrad friktionsjord bedömer Andréasson (2010) att packning kommer att vara tillräckligt för att friktionsjorden ska uppnå en tillfredställande vågutbredningshastighet så att höghastighetsfenomenet undviks. Packning av sådana löst lagrade friktionsmaterial anges även krävas utifrån sättnings synpunkt (Andréasson, 2010).

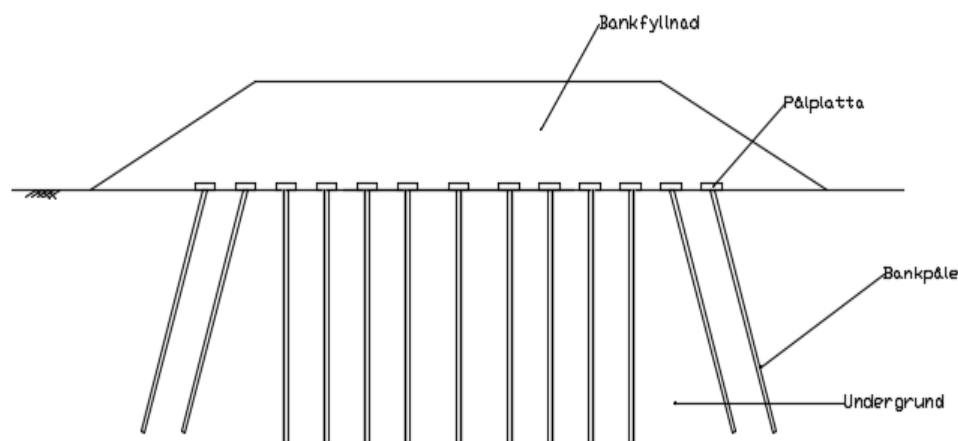
3.5.3 Kalkcementpelare

Vid anläggning av vägar och järnvägar på lös mark har kalkcementpelare de senaste decennierna blivit en vanlig metod att använda sig av. Genom att blanda en mix av kalk

och cement med den lösa jorden skapas det ett styvare och starkare material. Vanligtvis rör det sig om lera eller siltig lera som blandas med kalk/cement vilket reagerar med vattnet i jorden och ger en jord med lägre vatteninnehåll och högre styvhet. Det är ett effektivt sätt att minska sättningar och även få en högre säkerhet mot brott (Sällfors & Alén, 2009). Det finns även goda erfarenheter av kalk/cement och andra bindemedel för att åtgärda höghastighetsfenomenet. Det har gjort det till den i Sverige mest använda metoden för grundläggning av järnvägar för höga hastigheter på lera (Andréasson, 2010). Enligt beräkningar i Andréasson (2010) skulle det dock krävas en mycket hög andel förstärkning med kalkcementpelare för att uppnå önskvärd marginal till höghastighetsfenomenet för en dimensionerande tåghastighet på upp mot 400 km/h.

3.5.4 Bankpålning

För grundläggning på lera är också bankpålning ett alternativ som är vanligt vid bankhöjder på 5 m och mer (Andréasson, 2010). Det innebär att bankpålar används för att överföra last från bank och trafik till bärkraftig jord eller berg. Överst sitter pålplattor som jordlagret ligger på, se i Figur 7 (Avdelning Teknik Sektion Väg- och Geoteknik, 1995).



Figur 7 Principskiss bankpålning

Det kan vara en lämplig metod för ballastfritt spår då den ger en i princip sättningsfri grundläggning. Ifall grundförstärkning med kc-pelare kräver en mycket hög förstärkningsandel skulle bankpålning kunna vara ett mer ekonomiskt alternativ. En förenklad analys som utförts visar att det även med grundläggning på bankpålar kan uppträda ett höghastighetsfenomen och i lös lera kan också omgivningsvibrationerna av betydande storlek uppkomma (Andréasson, 2010).

3.5.5 Påldäck eller bro

Att grundlägga höghastighetsjärnvägen på påldäck, eller till och med en bro (vilket visas i Figur 8), vid sämre undergrund är en relativt vanligt förekommande metod internationellt. Det är den kostsammaste grundläggningsmetoden men attraktivt i och med de höga sättningskraven som gäller för fixerade spår (Andréasson, 2010).



Figur 8 Grundläggning på bro (Esveld, 2001).

3.6 Materialmodeller och programvaror

3.6.1 Materialmodeller

Här presenteras övergripande de olika materialmodeller som har kommit att diskuteras mer ingående under arbetets gång. Samtliga finns tillgängliga i någon av de programvaror som presenteras nedan.

3.6.1.1 Linjärelastisk

Den linjärelastiska materialmodellen baseras på Hooke's lag och förutsätter isotropiska förhållanden. Modellen kräver att två linjära materialparametrar, elasticitetsmodulen E och Poissons tal ν , är kända. Det ses normalt inte som en lämplig geoteknisk modell eftersom jordmaterial har ett ickelinjärt och irreversibelt beteende (PLAXIS, 2016b).

3.6.1.2 Mohr-Coulomb

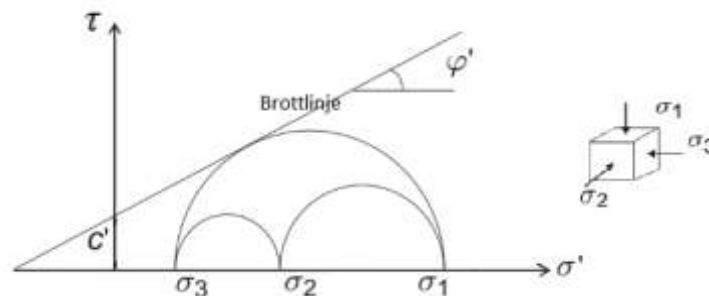
Mohr-Coulomb är en linjärelastisk idealplastisk modell som ofta är lämplig att använda som en första approximation. Det linjärelastiska beteendet i modellen baseras på Hooke's lag och den idealplastiska delen beskrivs av Mohr-Coulomb's brottkriterium, se Figur 8 (PLAXIS, 2016b).

Analysen kräver indata i form av fem olika parametrar:

- E (elasticitetsmodulen) och ν (Poissons tal) som beskriver det elastiska beteendet
- φ (friktionsvinkeln) och c (kohesionen) för att beskriva plasticiteten samt
- ψ (dilatationsvinkeln)

Modellen tar däremot inte hänsyn till att styvheten hos jordmaterial beror av rådande spänningsförhållanden, spänningshistoriken och uppkomna deformationer (PLAXIS, 2016b).

Om dynamiska beräkningar utförs med Mohr-Coulomb modellen är det viktigt att jordens styvhetsparametrar väljs så att modellen beskriver markens skjuvvågshastighet korrekt. Vid dynamisk eller cyklisk belastning kan det hända att Mohr-Coulomb modellen ger plastiska töjningar om spänningen överstiger Mohr-Coulombs brottkriterium, brottlinjen i Figur 8. Sådana plastiska töjningar kan ha en dämpande effekt på de dynamiska krafterna. Ifall spänningscyklerna däremot håller sig inom Mohr-Coulomb's brottkriterium uppstår endast elastiska töjningar och då fås ingen dämpande effekt eller någon ackumulering av deformationer eller portryck (PLAXIS, 2016b).



Figur 9 Mohr-Coulombs brottkriterium

3.6.1.3 Hardening Soil (isotropisk härdning)

"Hardening Soil" är en mer avancerad materialmodell som främst karakteriseras av att den tar hänsyn till att jordens styvhet beror av spänningen. Modellen lämpar sig däremot inte för att beskriva krympning, som är en tidsberoende deformation (PLAXIS, 2016b). Den totala töjningen beräknas med hänsyn till att jordens styvhet varierar. Det skiljer sig för förstagångsbelastning och för på- respektive avlastning. Härdningen av jordmaterialet antas vara isotropisk, alltså lika i alla riktningar. Den antas också bero av den plastiska skjuvningen och materialets töjning. Vid förstagångsbelastning minskar jordens styvhet allt eftersom plastiska deformationer uppstår (Schanz, Vermeer, & Bonnier, 1999).

Modellen har sitt ursprung i plasticitetsteorin och den kännetecknas av följande egenskaper, hämtade från PLAXIS (2016b):

- Styvheten beror av spänningen
- Plastiska töjningar till följd av förstagångsbelastning
- Plastiska töjningar till följd av tryck
- Elastisk på- och avlastning
- Brott enligt Mohr-Coulomb's brottkriterium

Det går att skilja på härdning genom skjuvning och härdning genom hoptryckning/kompression. Härdning genom skjuvning används för att modellera

bestående töjningar till följd av förstagångsbelastning och härdning genom hoptryckning för att modellera bestående plastiska töjningar från isotropisk belastning (PLAXIS, 2016b).

Vid dynamiska beräkningar är det viktigt att markens elastiska styvhet väljs så att modellen korrekt kan förutsäga markens skjuvvågshastighet. När en Hardening Soil modell utsätts för dynamisk belastning kommer plastiska deformationer att uppstå om materialets skjuvhållfasthet överstigs (härdning genom skjuvning) eller om förkonsolideringstrycket uppnås (härdning genom hoptryckning). Ifall spänningarna däremot inte uppnår något av dessa härdningsvillkor kommer, liksom för Mohr-Coulomb modellen, endast elastiska töjningar uppstår och dämpning undvikas (PLAXIS, 2016b).

3.6.1.4 Soft Soil Creep

Till skillnad från exempelvis "Hardening Soil Model" är "Soft Soil Creep Model" utvecklad för att beskriva krypning i lerjordar. Modellen omfattar en särskild parameter för krypning och modellen genererar kryptöjningar så länge det finns en effektivspänning. I vilken takt krypdeformationer uppkommer i modellen beror till stor del på jordens konsolideringsgrad. Andra grundläggande funktioner i "Soft Soil Creep Model" är en spänningsberoende styvhet, att den skiljer på förstagångsbelastning respektive avlastning och pålastning samt att den har ett brottbeteende enligt Mohr-Coloumb (PLAXIS, 2016b).

3.6.1.5 Sekiguchi-Ohta

Materialmodellen Sekiguchi-Ohta är utvecklad för normalkonsoliderad lera. Speciellt är att den tar hänsyn till spänningsinducerad anisotropi för anisotropiskt konsoliderad lera. Den beskriver även det tidsberoende och elastoplastiska beteendet hos normalkonsoliderad lera (PLAXIS, 2016b).

3.6.2 Programvaror

Här följer en kort presentation av de programvaror som senare nämns och diskuteras i resultatet. De programvaror som ingick i den ursprungliga programinventeringen men som sedan ej har kommit att diskuteras i intervjuerna presenteras inte här. Informationen om programvarorna är främst hämtad från programmanualer och från hemsidor tillhörande programvarorna.

3.6.2.1 PLAXIS

PLAXIS är ett finita elementprogram (FEM-program) utvecklat för att analysera deformationer, stabilitet och grundvattenflöden i geotekniska tillämpningar. En mängd geotekniska analyser kan utföras, såsom analyser av statisk elastoplastisk deformation, stabilitet samt konsolidering och programmet erbjuder olika avancerade materialmodeller. I geotekniska tillämpningar krävs relativt avancerade modeller för att simulera icke-linjära, tidsberoende och anisotropiska beteenden hos jord- och bergmaterial (Brinkgreve, et al., 2016).

PLAXIS började utvecklas 1987 i syftet att vara ett verktyg för geotekniker som inte nödvändigtvis var numeriska specialister eller vana vid att utföra icke-linjära finita element analyser. När geometrin ritats upp kan ett ostrukturerat finita elementnät/mesh automatiskt genereras och manuellt justeras om det önskas ett tätare nät. Det går också att lägga in information från ett eller flera borrhål för att definiera jordlager. Om fler än ett borrhål läggs in interpolerar PLAXIS automatiskt jordlager mellan borrhålen (Brinkgreve, et al., 2016).

För beräkningarna går det att använda sig av en enklare materialmodell som Mohr-Coloumb. Det går också att använda mer avancerade materialmodeller för elastoplastiska

analyser när man önskar ta hänsyn till ökad styvhet vid såväl små som stora spänningar och för analys av tidsberoende deformationer med mera (Brinkgreve, et al., 2016).

Exempel på materialmodeller som finns tillgängliga i PLAXIS är:

- Linjärelastisk
- Mohr-Coloumb
- Hardening Soil
- Hardening Soil with Small Strain Stiffness
- Soft Soil
- Soft Soil Creep Model
- Sekiguchi-Ohta
(PLAXIS, 2016b)

De materialmodeller som främst har kommit att diskuteras i den här rapporten beskrivs mer ingående ovan.

Det finns också olika element som kan användas för att modellera bland annat geotextiler, pålar, stag och balkelement samt ett så kallat interfaceverktyg som kan användas för att modellera interaktionen mellan jordmaterialet och andra material eller konstruktioner. Det är också möjligt att beräkna minskningen av portryck med tid i en konsolideringsanalys om jordlagrens permeabilitet angivits. Resultaten från en analys i PLAXIS presenteras grafiskt. Om exakta värden på deformationer, spänningar, töjningar och krafter önskas hittas det i tabeller över utdata (Brinkgreve, et al., 2016).

Dynamiska beräkningar

Enligt PLAXIS (2016a) bör verktyget för dynamiska beräkningar användas när spänningsvågor och vibrationer i marken behöver beaktas. För att applicera en dynamisk last i PLAXIS 2D anges ett indatavärde samt en så kallad ”multiplikator”. Det dynamiska värdet blir då indata multiplicerad med multiplikatorn i olika tidssteg. Man anger vilken typ av signal som ska beskriva den dynamiska effekten. De tillgängliga alternativen är *Harmonisk* eller *Tabell*. Harmoniska laster beskrivs i PLAXIS av:

$$F = \hat{M} \cdot \hat{F} \cdot \sin(\omega t + \phi_0) \quad \text{ekv 3}$$

där

\hat{M} = Multiplikator

\hat{F} = Indata för lasten

$\omega = 2\pi f$ där f = frekvensen i Hz

ϕ_0 = fasvinkeln i grader

($\hat{M} \cdot \hat{F}$ beskriver den dynamiska lastens amplitud)

För alternativet *Tabell* så definieras signalen genom att fylla i information om tid och temperatur i kolumner (PLAXIS, 2016a).

3.6.2.2 ZSOIL

På hemsidan för ZSOIL (ZSOIL, 2015) anges att ZSOIL är en programvara baserad på finita elementmetoden som numeriskt simulerar jord- och bergmekanik, konstruktioner över och under mark, interaktionen mellan jord och konstruktion och även dynamiska och termiska effekter. Det går att utföra beräkningar för de vanligaste situationerna inom geoteknik och grundläggning såsom beräkning av stabilitet, konsolidering, krypning och schaktning. Programmet anges lämpa sig för analyser inom områden som

geokonstruktioner, tunnlar, metrostationer, väg- och järnvägsbyggnad, dammar med mera (ZSOIL, 2015).

3.6.2.3 *Comsol Multiphysics*

Comsol Multiphysics är en generell programvara baserad på avancerade numeriska metoder. Det är ett FEM-program där det går att generera automatiska och semi-automatiska nät/mesh. I deras egen programbeskrivning anger de att programmet har ett unikt tillvägagångssätt som innebär att de finita elementens geometri inte är direkt kopplat till deras formfunktion vilket påstås ge en maximal flexibilitet. Till Comsol Multiphysics finns också mer än 30 tilläggsprodukter som kan anpassas beroende på användningsområde. De anger också att det går att lägga in egna ekvationer som beskriver exempelvis materialegenskaper och gränsvillkor med mera. Programmet anges hantera material som är såväl icke-linjära som tidsberoende och icke-kontinuerliga och hanterar även icke-linjära och tidsberoende analyser (Comsol Inc., 2017a).

Programmet har även en modul för geoteknik, ”Geomechanics Module”, som är ett tillägg till den strukturmekaniska modulen. Denna är anpassad för att analysera geotekniska problem som släntstabilitet, schaktning och tunnlar. Modulen erbjuder även olinjära geotekniska materialmodeller och verktyg för att analysera deformationer, plasticitet, krypning och interaktion med olika typer av geokonstruktioner med mera (Comsol Inc., 2017b).

3.6.2.4 *FLAC*

FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua) är en programvara framtagen av Itasca Consulting Group, Inc för avancerade geotekniska analyser i 2D. Det används för att modellera jord, berg, grundvatten och grundläggning. Programmet använder sig av finita differens metoden och enligt Itasca Consulting Group, Inc själva kan det vara lämpligare än FEM-program när det kommer till analyser i flera steg, stora deformationer och töjningar, icke-linjära material eller instabila system (Itasca Consulting Group, Inc, 2017b).

Enligt Itasca Consulting Group, Inc (2017) erbjuder programmet som standard 17 olika inbyggda materialmodeller, några exempel är:

- Elastisk Isotropisk
- Mohr-Coulomb
- Ubiquitous-Joint
- Strain Hardening/Softening
- Hoek-Brown
- Plastic Hardening

3.6.2.5 *ABAQUS*

ABAQUS är en programvara som används över hela världen för att analysera olika mekanikproblem med finita elementmetoden. Det är ett generellt FEM-program med en rad olika tilläggsalternativ (Simulia, 2017). För geotekniska tillämpningar har programmet två- och tredimensionella funktioner som kan beakta jordmaterial och konstruktioner, total- och effektivspänningar och konsolidering med mera och utföra såväl statiska som dynamiska analyser (Helwany, 2007).

Enligt ABAQUS manualen (ABAQUS 6.14) från Simulia går det att utföra analyser för porösa medium genom att modellera det som ett flerfasmaterial, som en blandning av fast material och porer fyllda med kombination av två olika vätskor/gaser. Vanligtvis en vätska som antas vara relativt svår att komprimera samt en gas. Ett vanligt exempel på ett sådant

system är just ett jordmaterial med grundvatten. För att beskriva materialets beteende används principen med effektivspänning. Materialet modelleras i ABAQUS genom att ett finita elementnät/mech appliceras på den fasta fasen där vätska kan strömma genom meshen och flödet beskrivs av Darcy's lag (Simulia, 2017).

3.6.2.6 Ansys

Ansys är ett generellt FEM-program med produkter som erbjuder möjlighet att analysera problem inom i princip samtliga ingenjörsområden. De har produkter för bland annat termodynamik, elektromagnetism och strukturmekanik (Ansys Inc., 2017). I produkten för strukturmekanik, Ansys Structural, går det att utföra linjära statiska analyser för att få fram spänningar och deformationer och det går att analysera vibrationer samt att utföra mer avancerade icke-linjära analyser med fokus på dynamiska effekter (Ansys Inc., 2015).

3.6.2.7 NX Nastran

Nastran är också ett generellt FEM-program som används för att beräkna spänningar, vibrationer, brott och värmeöverföring med mera. Det är Siemens programvara och de anger att den kan användas i utveckling inom flyg- och bilindustrin, för elektronik och medicinsk utrustning med mera. NX Nastran anges kunna användas för att analysera de flesta strukturmekaniska problem och det erbjuder linjära analyser, avancerade icke-linjära analyser, dynamiska analyser av roterande system och analyser kopplade till aerodynamik med luftströmmar och liknande. Andra typer av dynamiska analyser är också tillgängligt och Siemens lyfter att en av NX Nastrans styrkor är just att det finns en mängd lösningar för dynamiska analyser (Siemens, 2014).

3.6.2.8 PFC- Particle Flow Code

Particle flow code (PFC) är en programvara från Itasca Consulting Group som tillämpar "Distinct element method" (DEM) (Itasca Consulting Group, Inc., 2017c). DEM är en numerisk metod som används för att beskriva det mekaniska beteendet hos osammanhängande kroppar. Material modelleras som diskontinuerliga medium som byggs upp av diskreta kroppar och beskrivs av samverkan mellan dessa. Lösningemetoden är en dynamisk process som beskrivs i tidssteg med konstanta förhållanden under varje tidssteg. Krafterna på varje partikel bestäms i alla tidssteg av interaktionen med de omgivande partiklarna baserat på Newtons andra lag (Itasca Consulting Group, Inc., 2017a). Användningsområden för programvaran PFC anges vara bland annat gruvindustrin, geoteknik, geovetenskap, läkemedel och förpackningsindustrin (Itasca Consulting Group, Inc., 2017c).

4 Resultat och analys

Här presenteras en tolkning av det som framkommit i intervjuerna. Först beskrivs de förutsättningar som de intervjuade valt att lyfta och sedan kommentarer och diskussioner kopplade till examensarbetets frågeställningar. Dessa behandlar programvaror för sättningsberäkningar, den dynamiska lastens effekter, dynamiska programvaror och validering av såväl sättningsberäkningar som dynamiska analyser.

4.1 Förutsättningar

Till en början beskrivs här de förutsättningarna i höghastighetsprojektet som de intervjuade har lyft. Flera av de intervjuade tar upp att det nu är beslutat att höghastighetsbanorna ska byggas med någon typ av fixerat spår eller ”slab track” vilket de beskriver ska ge en beständig spårgeometri, en styvare överbyggnad och ett relativt underhållsfritt spår. Ett par av de intervjuade tar upp att med en styv överbyggnad fås en större lastspridning vilken ger mindre spänningsökningar och sättningar. Svårigheter som tas upp är dock de strikta sättningskraven och utmaningen med att hitta något kostnadseffektivt.

I en intervju nämns att järnvägsbanken möjligen kommer att bli mer väldefinierad och av en högre kvalitet jämfört med för konventionell järnväg. Detta på grund av att rör sig om ett ballastfritt spår med mycket strikta sättningskrav.

En annan av de intervjuade reflekterar över att den svenska byggtekniken typiskt skiljer sig ganska mycket från övriga världen, till exempel att vår geologi präglar byggtekniken. Han säger: ”Det är väl egentligen den största huvudvärken vi har, tror jag. Hur vi ska kunna använda våra gamla metoder och praxis i det här nya sammanhanget”.

Vad gäller spårkonstruktionen beskrivs i en intervju att det finns olika konstruktionslösningar. En ”slab track” kan byggas upp av olika betonglager och olika flexibla skikt som verkar mellan de här olika betonglagrena. ”Hur ska man då välja massa och styvhet hos dessa för att det ska bli en dynamiskt bra konstruktion med låga kontaktkrafter med hjul och en bra lastfördelning ner till marken under slab track-konstruktionen?” är en fråga han ställer för att beskriva arbetet med spårplattan.

Flera av de intervjuade nämner också Trafikverkets kravdokument TSS (Teknisk systemstandard för höghastighetsbanor) som används i arbetet med höghastighetsbanorna.

4.2 Programvaror för sättningsberäkningar

En del av intervjuerna har syftat till att undersöka vilka programvaror som anses vara bäst lämpade för sättnings- och bärighetsberäkningar i arbetet med höghastighetsbanorna. Nedan presenteras de åsikter och kommentarer som framkommit. Det är främst FEM-program som har diskuterats och det har även framkommit några kommentarer om specifika programvaror. Resonemang kring dynamiska effekter och programvaror för dynamiska beräkningar presenteras i avsnitt 4.3 respektive 4.4 nedan.

4.2.1 FEM-program för geotekniska beräkningar

Nästan samtliga intervjupersoner tar upp finita elementprogram som det i närmast självklara valet för såväl sättningsberäkningar som för dynamiska analyser av mark- och bankmaterial. Den allmänna uppfattningen är att man bör använda ett FEM-program anpassat för just geotekniska beräkningar när sättningar och stabilitet ska beräknas så att det finns lämpliga moduler och materialmodeller.

Några av de intervjuade är inne på att det antagligen går att utföra motsvarande beräkningar i generella FEM-program till viss mån. Det kräver dock mycket mer egen kunskap i och med att det inte finns några färdiga materialmodeller och man då måste generera egna. En intervjuperson beskriver att om till exempel Abaqus, som är ett generellt FEM-program, används kan det finnas en generell materialmodell som råkar lämpa sig för geoteknik om rätt indataparametrar anges. Men det kan kanske beskriva något helt annat med andra parametrar vilket kan vara svårt att utläsa direkt om man inte har lång erfarenhet.

En av geoteknikerna nämner Plaxis, Zsoil, Flac och Comsol Mutiphysics som lämpliga program för geotekniska tillämpningar. Flac är ett finita differensprogram och de andra är finita elementprogram. Kommentarer om några av dessa programvaror presenteras under separata rubriker nedan. Intervjupersonen tycker att någon som är erfaren bör göra en känslighetsanalys i sådana program och sedan se vilken av programvarorna som ger bäst resultat. Han säger också att beroende på hur komplexa problemen är så kan det uppstå problem med numerisk instabilitet och problem som är kopplade till vilken ”solver” du använder. ”Är det ett komplext problem med komplex geometri så gäller det att få ihop det rent numeriskt. Då kommer både materialmodell, vilken ”solver” du använder och hur du genererar ditt nät att ha betydelse.” Han säger dock att om man endast har en bank med en järnväg ovanpå så blir problemet vanligtvis inte så komplext.

En annan av geoteknikerna säger att sättningsberäkningar är rena statiska beräkningar och att det är lämpligt att använda till exempel Plaxis där det finns lämpliga materialmodeller. Han berättar också att det är svårt att hitta en materialmodell som passar perfekt och att särskilt krypning kan vara svårt att modellera. ”Man vill försöka hitta den modell som passar bäst men den ena kanske modellerar momentana sättningar bättre och den andra kanske modellerar krypsättningar på ett bättre sätt.” En av de andra intervjupersonerna säger också att just krypsättningarna är av stort intresse att modellera på ett lämpligt sätt.

I en intervju kommenteras att ickelinjära analyser generellt kräver ganska mycket erfarenhet, både av den specifika programvaran, numeriska analyser samt den fysiska problemställningen.

Slutligen nämner en av de intervjuade att det som också skiljer programvarorna åt är faktorer som användarvänlighet, i vissa fall beräkningstid och inte minst kostnaden av programmen. Ett par av de intervjuade går också in på vikten av att förstå problematiken, förstå mekaniken, när man använder sig av FEM-program. I en annan intervju berättar intervjupersonen att när de arbetar med FEM-program så kan de även använda förenklade analytiska metoder men endast för att verifiera resultaten på ett översiktligt plan.

4.2.1.1 *Plaxis*

Plaxis nämns som ett alternativ av de nästan alla som intervjuats och här sammanställs kommentarer som berör just Plaxis. Flertalet av de intervjuade uttrycker dock att andra kommersiella FEM-program med liknade moduler och materialmodeller går precis lika bra och att det snarare handlar om personlig preferens. En av geoteknikerna nämner att Plaxis

har vissa begränsningar när det kommer till att modellera bland annat armerad betong. I en intervju beskrivs att de i projektet med Ostlänken i dagsläget har modellerat betongplattan i det fixerade spåret som en oarmerad betong i Plaxis, som ett första antagande. Han berättar att det senare kan bli aktuellt med en armerad eller fiberarmerad betong. I övrigt beskrivs Plaxis i en intervju som ett välutvecklat program med avseende på materialmodeller, geoteknik och statiska beräkningar, även med hänsyn till långtidseffekter.

En geotekniker som arbetar i projektet med Ostlänken berättar att de i dagsläget använder Plaxis för att räkna på långtidssättningar i bankkroppen och undergrunden. De beräknar hur mycket krypsättningar som beräknas uppkomma efter byggtiden, när det har gått ett respektive 60 år. För bankkroppen har de i dagsläget valt att använda en "Hardening Soil Model". De har antagit en modell där undergrunden består av en mellanjord med fem meter krypbenägen silt överst och under det en icke krypbenägen silt. Den här modellen använder de nu för att utvärdera och kalibrera sina modeller. För den antagna, förenklade undergrunden undersöker de olika modeller för att hitta den lämpligaste. De materialmodeller som de hittills har prövat är "Kelvin-Voigt", "Sekiguchi-Ohta" och "Soil Creep Model". I dagsläget bedömer de att materialmodellen Sekiguchi-Ohta är något bättre på grund av hur den hanterar förbelastning och kontroll av krypförloppet.

4.2.1.2 Zsoil

En av geoteknikerna är av uppfattningen att Zsoil är den programvara som erbjuder flest materialmodeller. I övrigt framställs Zsoil av några av de intervjuade som ett program som, i det stora, är likvärdigt Plaxis.

4.2.1.3 Comsol Multiphysics

Comsol multiphysics nämns som ett kompetent program av en av geoteknikerna som intervjuats. Han beskriver vidare att en fördel med programvaran är att det går att använda en nedbrytningsmodell som inte behöver finnas i programvaran, så länge den går att skriva i en Mathlabkod. Det går också att göra väldigt stora nät om det behövs, vilket kan distribueras ut på många datorer. Enligt en av de intervjuade går det också att hantera dynamiska analyser. "Jag tror att du får med dig och kan hantera det mesta i Comsol multiphysics och i Zsoil", säger han och menar att dessa två är de FEM-program han allmänt skulle rekommendera för geotekniska analyser.

4.2.2 Distinct Element Method (DEM)

En av intervjupersonerna hade uppfattningen att det inte är speciellt viktigt att modellera sättningar under banken över huvud taget. Intervjupersonen menar att eftersom det kommer att ställas höga sättningskrav så kommer sättningsbenägna material att förstärkas, med exempelvis pådäck eller kc-pelare, vilket gör att konsolideringssättningar under banken i princip kommer att vara obefintliga längs hela sträckan. Därmed menar han att det är egensättningar i banken som kommer att vara den stora frågan, alltså nedbrytning av materialet. Här sammanfattas intervjupersonens beskrivning av detta:

I nedbrytningen av materialet kommer många aspekter in såsom antal lastcykler, frostcyklar, kemiska processer och omlagring av materialet. Det går inte att använda kommersiella FEM-program för att modellera dessa förlopp utan det enda som kan användas för att modellera partiklarnas förhållande till varandra är "Distinct Element Method" (DEM) där varje partikel modelleras. Detta är dock beräkningsmetoder som är relativt nya att använda inom geoteknik och det används främst på högskolor och forskningsinstitut. En aktuell DEM-programvara är PFC: Particle Flow Code från Itasca Consulting Group. Där går det att modellera jordpartiklar och att lägga in villkor på när

partiklarna går sönder med mera. Modellerna blir dock ganska komplicerade med långa beräkningstider.

4.2.3 Spår- och fordonsdynamik

I en intervju beskrivs att för att modellera spårets överbyggnad, det fixerade spåret, används i dagläget Mathlab i ett forskningsprojekt. Längre fram kommer de dock antagligen behöva använda någon kommersiell FEM-programvara för en mer detaljerad modell. De nämner då Abaqus och Ansys som alternativ.

I intervjun beskrivs också att ifall man istället vill analysera själva fordonet/tåget är det programvaror som Simpack, Gensys eller Vampire med flera som gäller. I en annan intervju nämns också Gensys för fordonssimuleringar.

4.3 Dynamiska lastens effekter

Det finns en del skillnader i uppfattningen hos de som intervjuats angående den dynamiska påverkan från tågtrafiken och hur den bör beaktas. Vissa har varit inriktade på spårkonstruktionen eller broar vilket endast berörs kortfattat. Här eftersträvas att beskriva de tankar som kommit fram om i hur stor utsträckning dynamiska effekter bör beaktas och övergripande hur man bör utföra dynamiska analyser.

4.3.1 Spårkonstruktionen

Från de som främst arbetar med spårkonstruktionen framgår det tydligt att den dynamiska lasten från tågtrafiken självfallet är av mycket stor betydelse för själva spårkonstruktionen. En av de intervjuade säger att: ”När hastigheten är över 60 km/h bör man ta hänsyn till den dynamiska lasten, och ju högre hastighet desto viktigare blir dynamiken” angående sitt arbete med spårdynamik.

4.3.2 Två olika fenomen

När det kommer till effekter i bank- och markmaterial beskriver en av de intervjuade att det finns två skilda fenomen. Han säger att det ena fenomenet är då tågarten sammanfaller med Rayleigh-vågfarten och man får det som kallas för kritisk tågarter. Om man har konstruktioner som förstyrkar banan så fås en något högre Rayleigh-vågfart nära konstruktionen och en annan Rayleigh-vågfart längre bort. Det andra fenomenet som nämns är sättningsbenägenheten. De flesta av de intervjuade ser detta som två separata analyser. Andra kommentarer angående detta är:

”Det är två helt olika delar, skulle jag påstå. Sättningar är ett långtidsbeteende hos jorden som inträffar under en relativt lång period och då är styvhetsförhållandena annorlunda jämfört med vid dynamiska effekter då lasten är mycket kortvarig. Normalt sett brukar styvheten vara betydligt större vid sådana dynamiska belastningar. Så i min värld är det två separata beräkningar med separata uppsättningar egenskaper.”

”När fokus inte är dynamik utan t ex bärighet kan man köra med statiska analyser, så det beror helt på problemet och ens fokus.”

”Jag tror att det är separata beräkningar dels för att man har olika typer av gränstillstånd. Sedan är det andra effekter som har mer betydelse i dynamiska analyser än i statiska”

Sättningsanalyser ser man gärna utföras som rent statiska beräkningar med icke-linjära materialmodeller för jordmaterialet. Många uttrycker att de dynamiska analyserna, främst eller endast, syftar till att analysera den kritiska hastigheten för systemet för att säkerställa att det inte uppkommer något resonansfenomen.

För dessa analyser har en och samma strategi lagts fram av flera av de intervjuade. De beskriver att man utgår ifrån att höghastighetsbanorna kommer att byggas så att man säkerställer att gränstörningarna för plastiska deformationer inte överskrids och att man därmed kan använda sig av en linjärelastisk modell för dynamiska analyser. Några citat från olika intervjupersoner är:

”När det gäller dynamiska analyser vill man försöka förenkla dem i möjligaste mån till att vara linjärelastiska, så länge man kan motivera att tilläggsspänningarna från den dynamiska lasten är tämligen linjära”.

”Vi vill inte att det ska bli några stora töjningar någonstans eller några variationer i spänningstillstånd som leder till signifikanta variationer i materialegenskaperna. Så en linjär modell är ganska lämplig men man måste förvissa sig om att man inte överskrider någon gränstörning för plastiska deformationer”.

4.3.3 Icke-linjära dynamiska analyser

Som nämndes ovan tänker man i dagsläget, enligt flera av de intervjuade, sträva efter att utföra de dynamiska analyserna under linjärelastiska förhållanden. Alternativet är att utföra geotekniska icke-linjära, dynamiska analyser vilket tre av de intervjuade resonerar kring. De uttrycker snarlika åsikter som går ut på att det är möjligt att utföra den typen av analyser men att det både saknas kunskap och erfarenhet inom det området och att det blir väldigt tidskrävande analyser. En av de intervjuade hänvisar till spanska kollegor som arbetat med höghastighetsjärnvägen i Spanien. Han berättar att de beskrivit den här typen av beräkningar som generellt sett väldigt svåra. Nedan följer några andra kommentarer för att illustrera de intervjuades uppfattning i den här frågan.

”Vad det gäller geoteknik så finns det möjlighet att göra en icke-linjär dynamisk analys och då ta hänsyn till förändring i styvhet beroende på den dynamiska effekten och beroende på om man pratar om pålastning eller avlastning av jorden.”

”Om man ska göra dynamiska analyser vill man ofta förenkla. Man vill i möjligaste mån göra dem under linjärelastiska förhållanden även om det är fullt möjligt att göra det icke-linjärt.”

”Om man ska räkna dynamiskt så vill man gärna ha en linjär modell så att man blir klar någon gång. Även om det finns en del intressanta studier där man har tagit hänsyn till att moduler och dämpkvoter och sådant varierar med spänningstillståndet så vill vi samtidigt bygga bort det.”

Angående en begränsad kunskap och erfarenhet av olinjära dynamiska analyser lyder några kommentarer:

”I konsultbranschen tror jag inte många jobbar med dynamiska analyser inom geoteknik. Och om det är få som jobbar med dynamiska analyser så är det ännu färre som jobbar med kombinationen dynamiska analyser och icke-linjära egenskaper i marken.”

”Det är inte så många i Sverige som har koll på dynamik i järnvägsbankar och framförallt inte under höghastighetsbelastning. Erfarenheten är begränsad.”

En av de intervjuade nämner att han erinrar sig att man i Japan har erfarenhet av att använda icke-linjära moduler för jordens egenskaper och dynamiska beteende när det handlar om jordbävningbelastningar. Han är dock noga med att påpeka att han själv inte har någon kunskap om hur det fungerar.

4.3.4 Höghastighetsfenomenet

Som nämnt ovan anses dynamiska analyser till stor del syfta till att utvärdera risken för att det uppstår resonans. Resonans uppstår genom att den kritiska hastigheten för systemet eller markens skjuvvågshastighet uppnås. Här presenteras kommentarer som kommit fram kopplat till detta höghastighetsfenomen.

En av de intervjuade beskriver att vågutbredningsproblem rör sig om elastiska deformationer och att de programvaror som han känner till som studerar detta antar linjärelastiska markmaterial. Han säger också: ”Är det för mjukt och skjuvvågshastigheten är för låg i förhållande till tågens hastighet kan det bli väldigt stora problem även i det elastiska området, med stora deformationer.” En annan av de intervjuade beskriver banken och undergrunden som ett system som samverkar där hela systemet har en kritisk hastighet som man inte vill att tågets hastighet sammanfaller med. Han säger att det är just kritisk hastighet som man vill säkerställa att man har en tillräcklig säkerhetsmarginal mot genom att beräkna den kritiska hastigheten för järnvägssystemet och undergrunden. Ytterligare en kommentar angående resonans är att fenomenet i stor utsträckning beror av massa och styvhet och att det är väldigt svårt att dra generella slutsatser när man närmar sig resonansområden. ”Det som man verifierar i dynamiken är att man har resonansproblem och i min erfarenhet av konstruktioner är det i vissa områden små förändringar i styvhet och massa som orsakar problemet resonans.”

Det har framkommit lite olika diskussioner kring hur stor betydelse de här dynamiska effekterna har. En av de intervjuade uttrycker det enligt följande: ”Under inga omständigheter kommer man att tillåta att man kommer nära det som kallas för kritisk hastighet. Man får helt enkelt utforma banken och spåret så att man inte får de fenomenen. Om du har en spårplatta och en styv undergrund så kommer du att ha höga kritiska hastigheter.” Uppfattning från intervjuerna verkar vara att det är viktigt att det här fenomenet inte uppstår. Däremot finns det lite olika tankar kring i hur stor utsträckning det är nödvändigt att analysera detta och hur man bör arbeta med sådana frågor.

En av geoteknikerna säger angående höghastighetsfenomenet att: ”Jag tror att en styv överbyggnad minskar de problemen. De problemen är relaterade till mjuk undergrund och traditionell överbyggnad med järnvägsballast och underballast”. Han tror inte att det är något som man behöver fokusera speciellt mycket på i det här projektet. I en annan intervju är intervjupersonen till viss del inne på samma spår. Han säger att ifall det förekommer dåliga markförhållanden längs med höghastighetsbanan så kommer den att grundförstärkas. Detta gör att det troligen inte kommer att förekomma så dåliga markförhållanden som det har varit där man tidigare har haft problem med resonanseffekter. Ytterligare en intervjuperson säger att där man har väldigt styv undergrund så är det antagligen inte någon stor risk för höghastighetsproblem. Majoriteten av de intervjuade tycker dock att risken för att resonans uppstår är något som bör analyseras. Hur detta ska göras råder det däremot större osäkerhet kring.

En av intervjupersonerna ger följande kommentar: ”Att tåghastigheten närmar sig markens skjuvvågshastighet, vågutbredningshastigheten, blir speciellt just för en hastighet över 320 km/h och är någonting som vi måste titta på.” Ytterligare en kommentar är: ”Jag tror att de dynamiska effekterna kommer att vara avgörande för hur väl vi lyckas bygga banan. Vi ska bygga med 120 års livslängd och då är det ofrånkomligt att de tusentals passager som

kommer att ske under konstruktionens livslängd kommer att ge upphov till betydande problem om man inte har dimensionerat på ett klokt sätt med avseende på dynamiska effekter.”

En annan av de intervjuade berättar att arbete rörande grundförstärkning pågår där de försöker förstå hur geokonstruktioner påverkar den kritiska farten. Han berättar att det i Ostlänken främst är påldäck som är aktuellt vilket förstyrkar och gör att vågutbredningshastigheten blir högre nära konstruktionen. Längre bort, vid sidan av järnvägsstrukturen, fås då en annan vågutbredningshastighet.

4.3.5 Bankhöjdens inverkan

En av frågeställningarna gäller vid vilken bankhöjd det går att bortse från dynamiska effekter. Här har ingen av de intervjuade kommit med ett rakt svar eller antytt att det finns någon sådan slutsats. Däremot har det framkommit en del resonemang kring frågan med bankens och bankhöjdens inverkan. En av de intervjuade beskriver att en stor bank är ett trögt system. Han säger att på grund av risken för sättningsproblem kommer dålig mark att förstärkas vid stora bankhöjder. Om bankhöjden däremot är låg tror han att det är känsligare för höghastighetsproblem generellt sett. Han säger också att ifall marken är väldigt lös görs det antagligen robusta grundförstärkningar så det svåraste blir antagligen bank på mellanjordar. ”Löslagrad sand och silt som inte är jättelösa men inte jättest fasta heller, där kan jag tänka mig att man behöver göra en del kontroller.”

I en annan intervju säger intervjupersonen att även för vecka bankar med lägre tågarter så filtrerar banken ut mycket påkänningarna. Vågorna hinner dö ut ganska mycket redan i banken, innan de når de naturliga jordlagren. Han påpekar att nu ska vi dessutom bygga med väldigt styva material och säger: ”Det är klart att en högre bank är mer konservativ, mer gynnsamt ur den synvinkeln.” Han säger att det också är en utredningsfråga att se hur grundläggning med exempelvis pålar/påldäck påverkar.

En av intervjupersonerna kommenterar att det beror på hur underbyggnaden ser ut, vilken typ av dynamisk analys man är ute efter och vad själva banken har för beskaffenhet.

4.3.6 När behövs dynamiska analyser?

Det finns olika uppfattningar om i hur stor utsträckning det kommer vara nödvändigt att analysera de dynamiska effekterna med beräkningar. En av de intervjuade resonerar som så att banken kommer att ha en viss beskaffenhet och ifall marken under till exempel består av stora mäktigheter av lera så kommer det behövas ett påldäck eller liknande. Pådäcket kommer då att dimensioneras så att det har en bärlast både med avseende på statisk last, med avseende på sättningar, och eventuellt även med avseende på dynamik. Det är dock möjligt att den statiska dimensioneringen kommer att räcka och göra att det ändå inte uppkommer problem med dynamisk last. Frågan är var den gränsen går. Han säger: ”Om du ändå måste dimensionera den rent statiskt för att hålla en viss last och så att den inte ska ge upphov till några sättningar så finns det en möjlighet att du inte får så mycket problem med dynamisk last ändå. Men riktigt var den gränsen går, det vet jag inte.”

Intervjupersonen här ser att risken är att ifall alla konsulter ska lösa den här frågan på egen hand så kommer alla att sitta och räkna på samma sak med olika framgång med avseende på resultat och hur lång tid det tar att göra analyserna. Han menar att man kanske bör börja med att titta i litteraturen på vad som gjorts tidigare. Man bör undersöka ifall det går att göra några ingenjörsmässiga överslag för att till exempel uppskatta styvhet och sedan

försöka resonera utifrån det för att komma fram till när den här typen av analyser kan vara bra eller inte. ”Så kan man ha det som en första startpunkt” säger han.

I en annan intervju anser intervjupersonen att det behöver göras någon typ av utredning längs hela järnvägssträckningen men att man eventuellt kan använda övergripande kriterier. Han beskriver att man då skulle kunna göra enklare kontroller för att se var man är på den säkra sidan, i de områdena behöver man då inte göra en fördjupad utredning. Han säger: ”Man behöver titta på alla områden och göra ett överslag, eller se om det uppfyller någon form av villkor. Då kan man avskryva vissa områden och lokalisera andra områden där man måste fördjupa sig. Där man har en väldigt styv undergrund och liknande är det nog inte någon stor risk för höghastighetsproblem.”

En av de som intervjuats anser att de dynamiska effekterna inte kommer att vara speciellt viktiga att titta på i höghastighetsprojektet över huvud taget. Han tror inte att det blir avgörande ifall man väljer att ha ett fixerat spår med en så pass styv överbyggnad. ”Jag tror inte att det kommer bli kritiskt, nej. Om man inte hade haft en styv överbyggnad hade det kunnat bli”.

4.4 Dynamiska beräkningar och programvaror

Här sammanfattas kommentarer angående dynamiska beräkningar, både vad som bör beaktas vid modellering och vilka programvaror som kan vara lämpliga för dynamiska analyser.

4.4.1 Inverkan av fordon och spårkonstruktion

I en intervju berättar intervjupersonen att det i arbetet med höghastighetsbanorna ingår olika områden med olika tillhörande simuleringsverktyg. Det första området fokuserar på fordonet och fordonsdynamik, det andra på interaktionen mellan hjul och räl, det tredje fokuserar på banöverbyggnaden (spårplatta och ballast) och slutligen det sista området som fokuserar på undergrunden och jordmekanik. ”Så det är olika områden med olika simuleringsverktyg”, säger han och berättar också att mycket forskning pågår kring interaktionen mellan hjul och räl och att det har en mycket stor påverkan på de dynamiska effekterna.

I samma intervju säger han också att när han arbetar med banöverbyggnaden krävs detaljerade modeller av just spåret. Då man istället är inriktad på banunderbyggnaden och undergrunden tänker han dock att det bara krävs en enklare modell för fordon och spår och att man använder FEM-program för att simulera vibrationer och bärlighet. Däremot tycker han att man i analyser av banunderbyggnaden och undergrunden bör samarbeta med de som arbetar med fordonsdynamiken och använda deras resultat som indata i modelleringen. Han säger till exempel: ”För att lyckas med en simulering i de här FEM-programmen så krävs det riktigt indata med last från framförallt tåg och det är ofta svårt. För det måste man använda någon typ av fordonsdynamiska eller järnvägsinriktade program som kan räkna fram den här lasten.” Som exempel på program för fordonsdynamik nämner han Gensys och för simulering av banöverbyggnaden DIFF. I en annan intervju nämns Gensys, Simpack och Vampire som tillgängliga programvaror för fordonsdynamik.

I ytterligare en intervju berättar intervjupersonen att när det kommer till att analysera dynamiken har han konstaterat vikten av att modellera hela systemet, med både järnvägsbank och spåröverbyggnad bestående av spårplatta och mellanlägg mellan räl och

betongplatta. Just hur man modellerar anslutningen mellan räl och betongplatta ser han som det viktigaste även när ens inriktning är dynamik i bank och undergrund. Han beskriver att lasten i grund och botten kommer från rälen i infästningspunkterna och sedan går via betongplattan och sedan ner i järnvägsbanken. Alltså sker mycket av lastfördelningen i den övre delen av systemet. Han resonerar enligt följande: ”I FEM-modellering är det väldigt viktigt hur man modellerar kopplingen mellan räls och betongplatta. Vad jag har sett i alla fall avgörs styvheten främst högre upp, i anslutningen mellan räls och betongplatta och det mellanlägg som man lägger mellan rälen och betongplattan. Det har högre effekt än vad själva banken under har.” Han säger också att: ”Man ska absolut modellera hela systemet och lägga fokus på kopplingen mellan räl och betongplatta och försöka undvika singulära effekter i den kopplingen.”

4.4.2 Elastiska variationer längs med bank

I två av intervjuerna berättar intervjupersonerna att de arbetar med att titta på elastiska egenskaper längs med banken. De analyserar vilka styvhetsgradienter som man kan tillåta längs med spåret utan att få en förstärkning av de dynamiska effekterna. Det finns preliminära krav i den tekniska kravspecifikationen (TSS) på hur mycket styvheten får variera längs med spåret. För att modellera detta beskrivs i en intervju att de gör en relativt enkel modell där de lägger in olika styvhetsgradienter under själva betongkonstruktionen, med dämpare som är oberoende av varandra. De föreskriver en styvhet för de här fjädrarna som då kan variera längs med spåret. Då kan de titta på vilka styvhetsgradienter som de kan tillåta utan att det blir för höga krafter mellan hjul och räl som sedan fördelas ner i marken via de olika betongskikten i spårkonstruktionen.

4.4.3 Val av programvara

”Det handlar främst om smak och preferenser skulle jag säga. I och med att vi gör de här linjärelastiska antagandena är egentligen förutsättningen bara att man på något sätt kan fånga upp strålningsvillkoret så att man får en bra modell av vågutbredningen i marken” säger en av intervjupersonerna angående vilka programvaror som är lämpliga för dynamiska beräkningar. Han fortsätter med att förklara att med de modelleringsstrategier som de använder nu, med linjärelastiska antaganden, så anser han att man i stort sett kan använda vilket FEM-program som helst så länge man behärskar det.

Även för de dynamiska analyserna är de intervjuade eniga om att det är finita element- eller finita differensprogram som är det naturliga valet. Till skillnad från när det gäller sättningsberäkningar och liknande är det däremot främst de generella FEM-programmen som diskuteras. FEM-programmen anpassade för geotekniska tillämpningar nämns av några som möjliga alternativ. Den allmänna uppfattningen verkar dock vara att just de geotekniska FEM-programmen kan ha sina begränsningar när det kommer till dynamiska analyser. En av de intervjuade säger: ”Jag tänker mig att Abaqus eller liknande program fungerar bra. Sen finns Plaxis också vilket säkert fungerar för lite mindre modeller.”

En av de intervjuade berättar om examensarbeten där studenterna skulle analysera rörbroar och då genomförde dynamiska analyser av passerande tåg under linjärelastiska förhållanden. En exjobbare använde sig av Abaqus och två andra av Plaxis. ”Det gick att göra i både Abaqus och Plaxis men hur snabbt det går eller hur bra det blir beror dels på programvaran och dels på hur man handhar programvaran, det krävs en viss erfarenhet av det.”

De flesta har i intervjuerna utgått från det tidigare diskuterade antagandet om linjärelastiska förhållanden för de dynamiska analyserna. Ett par av de intervjuade går dock även in på att programvarorna de nämner både kan hantera icke-linjära analyser och dynamik men syftar då inte i första hand på geotekniska tillämpningar. En av dessa nämner Abaqus, Brigade Plus och Lusas med flera vilka alla är generella FEM-program och säger att de alla har materialformuleringar som lämpar sig för geotekniska analyser i brottgränstillstånd, exempelvis Mohr-Coulomb. Angående dessa program säger han att: ”Det går att modellera både broar och geotekniska konstruktioner och de klarar både linjära och icke-linjära analyser samt dynamik.”

I en annan intervju berättar intervjupersonen att han anser att de tre främsta generella FEM-programmen är Abaqus, Nastran och Ansys. I hans eget arbete använder han NX Nastran för dynamiska beräkningar. I valet av programvara tycker han att det handlar mycket om vilka moduler man kan använda sig av i de olika programmen. ”Det finns olika moduler för till exempel icke-linjär beräkning inom linjärelastiskt statiskt område och moduler för enkel dynamisk beräkning med tidsintegrering. Det finns även icke-linjära dynamiska moduler som tar hänsyn till förändring i styvhet både med hänsyn till spänning, tidintegrering och vad pålastning respektive avlastning har för effekt på styvheten.” Angående de tre programvaror han nämnt säger han att: ”Programvaror som Abaqus, Nastran och Ansys har så pass utvecklade icke-linjära moduler så att jag skulle säga att för vårt arbete med konstruktioner, såsom påldäck, har det inte jättestor betydelse vilken av de här tre man använder. Däremot så är de inriktade mest mot mekanik och struktur och inte så mycket mot geoteknik.”

Angående att använda dessa program för geotekniska tillämpningar för han följande resonemang: ”Det fungerar till viss del. Det finns möjlighet att använda dem just i de här studierna som t ex för en järnvägsbank och dynamiken i banken men det kräver en hel del handpålägg. Framförallt gäller det att hantera materialmodellerna för det finns inga färdigutvecklade materialmodeller avseende jordegenskaper. Det finns förenklade Mohr-Coulomb modeller men inga styvhetsberoende där förhållandet för styvhet till töjningar och spänningar är utvecklade på det sättet. Däremot så finns det möjlighet att generera egna materialmodeller.”

Några av de intervjuade berättar också om annan metod som kallas ”Boundary elements”. De tror att det också skulle kunna vara ett alternativ och en av de intervjuade anser att det främst avgörs av vilka färdigheter man har som beräkningsingenjör. I en annan intervju kommenteras det såhär: ”Sedan finns det andra programvaror utöver kommersiella finita element som kan vara användbara men de används, i min vetskap, mest inom forskning. Till exempel ”boundary element” är en typ av analysmetod som skiljer sig en del från finita element.”

4.5 Validering

Här sammanställs det som intervjupersonerna har valt att lyfta angående validering av den typen av beräkningar som diskuterats, både med hänsyn till sättningar och dynamiska påkänningar.

4.5.1 Sättningar

I några av intervjuerna beskrivs det att i och med de höga sättningskraven blir det extra viktigt att den största delen av sättningarna har utvecklats innan spåret läggs dit. En av

intervjupersonerna säger: ”När du lägger dit spåret och har riktat in det i sitt rätta läge inom något fåtal millimeter får det inte ske ytterligare sättningar för då kommer du få stora problem.” För att kontrollera detta beskriver några av de intervjuade att man har en beräkningsprognos för hur lång tid det kommer att ta för sättningarna att utvecklas. För att validera detta beskriver en av intervjupersonerna att man gör avvägningsmätningar på den uppbyggda banken vid olika tidpunkter innan banan tas i bruk. Det jämförs med prognosen för förväntade sättningar. En sådan validering av långtidssättningar beskrivs som en vedertagen metod. Några av de som intervjuat är också inne på att bygga upp och använda sig av en provbank för att kontrollera sättningsutveckling med mera. En av de intervjuade säger att en provbank bland annat skulle kunna användas för att se hur fördelningen mellan sättningar i undergrunden och sättningar i själva banken ser ut. Fler kommentarer om provbank presenteras nedan i avsnitt 4.5.3.

4.5.2 Dynamisk last

Något som har tagits upp i flertalet intervjuer är att man har arbetat med att instrumentera järnvägsbanan med exempelvis töjningsgivare och accelerometrar för att mäta responsen när ett tåg passerar. Den responsen kan sedan jämföras med den uträknade. I en intervju beskrivs också att det finns särskilda instrumenterade mätjul som sitter på tågen och kan mäta krafterna som verkar mellan hjul och räl. En annan av intervjupersonerna säger att det som är mest intressant att uppmäta är accelerationspekulering i järnvägsstrukturen för analys av bank och mark.

I en intervju säger intervjupersonen att: ”Det som jag har jobbat mest med är dynamiska mätningar i fält, av passerande tåg till exempel, eller andra typer av svängningar i brokonstruktioner. Det går att göra lika väl i geotekniska sammanhang, vilket man också har gjort rätt mycket.” Han beskriver att förutom att utföra mätningar när ett tåg passerar går det också att använda utrustning och själv generera en harmonisk last med känd last och frekvens. Han säger: ”Generellt, oavsett vilken tåghastighet eller vilket tåg du mäter för, inducerar du ett ganska begränsat antal frekvenser som beror på tågets fart och axelavstånd. Men fördelen om du har en kontrollerad belastning är att du då för in en harmonisk last med en given frekvens. Då kan du svepa den frekvensen och använda det för att validera modellen vid alla frekvenser inom det intervallet. Det har vi jobbat med de senaste åren för brokonstruktioner men det finns potential att även använda det för geoteknik.” Han beskriver att det ger en väldigt bra indata till modellerna som ska beskriva den dynamiska responsen men påpekar att det ofta blir dyrare att utföra försök med kontrollerad belastning jämfört med att mäta på passerande tåg.

Angående arbetet med geokonstruktioner i höghastighetsprojektet berättar en av intervjupersonerna om en idé som går ut på att man tar tillvara på och mäter på utländska projekt med fixerade spår. Man får då skapa en beräkningsmodell med deras geokonstruktioner, som kan skilja sig ganska mycket från svenska byggteknik, men det skulle gå att validera beräkningsmodeller indirekt på det sättet. Han säger att det är svårt med bankpålning, påldäck och liknande för det blir väldigt många parametrar.

I en intervju nämns även att det går att utföra dynamiska försök i labb genom att använda ”Bender element” vilket är en metod för att bestämma skjuvvågshastighet i jordmaterial.

4.5.3 Labbförsök och provbank

I två intervjuer är de inne på att det går att simulera labbförsök som ett första steg för att kalibrera sin modell. En av dem säger att: ”Då har du åtminstone i labbskedet validerat din

materialmodell och sen kan du göra det i full skala också. Det kan hända att det finns en skiftfaktor när man förstorar upp det till full skala. Fördelen med labbförsök är dock att där har du i princip full koll och kan jobba systematiskt igenom hela processen.”

Sedan tycker de att nästa steg är att bygga en så kallad ”mockup”, en modell antingen i full skala eller en nerskalad variant, vilket i det här fallet innebär en provbank. Detta är något som mer än hälften av de intervjuade är inne på. Flera beskriver att det i höghastighetsprojektet ses som en bra idé att bygga en provbank som det går att kalibrera modell och parametrar mot. Den typen av försök ses av flera av de intervjuade som ett bra alternativ men det påpekas även att det är tidskrävande. Ett par kommentarer är:

”Det bästa är att kalibrera mot något verkligt, en bank eller liknande. Men man måste ha tiden då.”

”Provning i full skala är det bästa, men det kan vara kostsamt beroende på vad som ska mätas och vid vilken belastning”

I en intervju beskrivs att tanken med en provbank är att den byggs upp och instrumenteras så att det går att mäta uppkomna deformationer. Sedan går det att skruva på parametrarna i motsvarande beräkningsmodell så att samma resultat fås i simuleringen av provbanken som i den verkliga provbanken. Intervjupersonen säger också att man skulle kunna använda provbanken för att mäta med seismik och på det sättet se hur överbyggnaden och undergrunden samverkar samt kolla på last och sättningar med mera. En av intervjupersonerna tycker att det intressantaste hade varit att bygga provbanken på en mellanjord med känd mäktighet och att ha en bankhöjd på 6–10 meter.

I en intervju påpekas vikten av att en eventuell provbank byggs så som det är tänkt. Han säger att om produktionspersonalen inte är införstådd med att banken ska användas för mätningar kan det hända att det slarvas och då är den inte till någon större användning vid valideringen av en modell.

4.5.4 Små töjningar

I ett par av intervjuerna diskuteras svårigheten med att modellera små vibrationsnivåer som ger små töjningar. En av de intervjuade säger: ”Det är sällan vi kör tågen i någon typ av resonansfart så vi får ofta ganska små vibrationsnivåer vid mätningar som inte är så enkla att återskapa med simuleringar. Det är oftast lättare att återskapa ett resonansstillstånd för det är på något sätt ett fortvarotillstånd som är mer väldefinierat. När du inte har resonans så är det allmänt lite svårare.”

För att validera simuleringar av sådana små töjningar berättar en annan av de intervjuade att de vill komplettera traditionella geotekniska undersökningarna, som bygger på statiska försök, med seismiska metoder. Han förklarar: ”Det är en väsentlig skillnad i storleken på modulerna om man har bruksgränstöjningar, små töjningar, eller om man har stora töjningar. För att få mer realistiska indata till de här dynamiska beräkningarna så bör vi försöka få fram empiriska data för moduler vid väldigt små töjningar istället.”

5 Diskussion och slutsatser

5.1 Resultatdiskussion

Utifrån de 10 intervjuer som genomförts går det att konstatera att de intervjuade har varit relativt eniga i vissa frågor medan uppfattningarna har skiljt sig mer åt i andra. Några av frågeställningarna i det här examensarbetet har också fått tydligare svar än andra. Här sammanfattas och diskuteras de viktigaste resultaten.

5.1.1 Programvaror för geotekniska beräkningar

De flesta av de intervjuade har haft liknande uppfattningar angående vilka programvaror som bör användas för sättningsberäkningar och liknande. Det har främst varit olika finita elementprogram som har diskuterats samt något finita differensprogram. Skillnaderna mellan de olika FEM-programmen har däremot inte diskuterats i någon större utsträckning. Några för- och nackdelar med olika programvaror har beskrivits men ingen utförlig analys eller jämförelse har gjorts. Det har inte heller förts någon djupare eller mer detaljerad diskussion kring vad de olika programvarorna klarar av och inte.

Vilket FEM-program man i slutändan bör använda sig av har det alltså inte framkommit några starkare åsikter om. Det beror dels på att programvaror i sig, exempelvis utveckling av programvaror, inte har varit den främsta kompetensen hos någon av de som intervjuats. Många av intervjupersonerna arbetar dock med FEM-program inom sina respektive områden och vikten av att ha ett FEM-program med lämpliga materialmodeller och moduler har varit ett återkommande ämne, särskilt med hänsyn till geotekniska analyser såsom sättningsberäkningar. Där ser de flesta att det underlättar betydligt att ha ett FEM-program som är anpassat till just geotekniska beräkningar och rekommenderar detta. Några nämner att det är möjligt att använda andra programvaror också, generella FEM-program, men de belyser att det kräver en helt annan kunskapsnivå hos personen som utför beräkningarna/simuleringarna.

5.1.2 Dynamiska lastens effekter och programvaror

För dynamiska beräkningar har det framkommit att syftet med analysen måste vara tydligt. Det är möjligt att utföra icke-linjära, dynamiska geotekniska analyser för att till exempel undersöka den dynamiska lastens betydelse för sättningar. En sådan analys kommer dock med en del svårigheter. Om de dynamiska analyserna däremot endast syftar till att analysera höghastighetsfenomenet anses en linjärelastisk modell vara tillräcklig, vilket ger enklare beräkningar. Den allmänna uppfattningen verkar vara att det främst är en analys av höghastighetsfenomenet som skulle vara aktuell i projektet med höghastighetsjärnvägen. Ett par av de intervjuade tycker knappt att den typen av analys kommer vara nödvändig heller eftersom de anser att den typen av problem är kopplat till traditionellt ballastspår i kombination med en lös undergrund.

För att analysera risken för att höghastighetsfenomenet uppkommer föreslås också att finita elementprogram som hanterar dynamiska beräkningar används. I och med att intervjupersonerna vill använda sig av en linjärelastisk modell för detta ses det är inte som nödvändigt att använda ett FEM-program anpassat för geoteknik. Det verkar istället finnas en uppfattning att några av de generella FEM-programmen hanterar dynamiska beräkningar bättre. De intervjupersoner som främst kommenterat detta arbetar framför allt med dynamiska analyser av broar, geokonstruktioner och andra konstruktioner vilket kan vara en av anledningarna till att de i första hand lyfter fram generella FEM-program. De anger att de själva använder sig av olika generella FEM-program för dynamiska analyser.

Några av de intervjuade diskuterar också vikten av att även modellera spårkonstruktionen och koppling mellan räl och betongplatta när dynamiken analyseras. Till det lämpar sig möjligen inte de geotekniska FEM-programmen, utan snarare de generella. En av de intervjuade är också inne på möjligheten att använda resultatet från fordonsdynamiska analyser som indata vid analys av dynamik i bank och undergrund. Även han nämner FEM-program för detta men han beskriver dock inte hur det skulle fungera eller i vilka FEM-program den möjligheten skulle finnas.

5.1.3 Bankhöjdens inverkan och risken för höghastighetsfenomen

En frågeställning gällde vid vilken bankhöjd det går att bortse från inverkan av dynamisk last. Den frågan har inte kommit att diskuteras i någon större utsträckning men däremot har det gett upphov till olika resonemang kring hur viktiga de dynamiska effekterna är att beakta. Det har diskuterats ifall dynamik alls kommer att vara avgörande för dimensioneringen, var det kan föreligga en risk för att resonansfenomen uppstår och hur man ska gå tillväga på ett systematiskt sätt för att analysera risken för resonans. Det har framkommit ganska skilda uppfattningar om hur stor betydelse de dynamiska lasterna kommer att ha för bank och mark och angående hur stor risken för resonansproblematik är.

En uppfattning har varit att i och med den höga hastigheten på 320 km/h så ökar risken för resonans och risken för ett höghastighetsfenomen kommer vara viktigt att beakta längs hela järnvägssträckan. Det har också förts resonemang som gått ut på att i och med den styva överbyggnaden och förstärkningsåtgärder med hänsyn till sättningar så kommer det inte över huvud taget bli aktuellt med något höghastighetsfenomen i det här projektet. Det kommer att byggas bort automatiskt och är inget man behöver lägga något större fokus vid.

Givetvis har mångas resonemang också legat någonstans mitt emellan dessa två uppfattningar. I en intervju kom till exempel förslaget att man kan arbeta utifrån att det görs någon typ av överslag längs med hela järnvägssträckningen. Detta för att försöka identifiera var det föreligger en större risk för resonanseffekter där det kan vara aktuellt med en djupare analys och i vilka områden det går att göra bedömningen att man är på säkra sidan direkt. Det verkar dock inte finnas någon utarbetad strategi för den typen av tillvägagångssätt och det verkar också råda en osäkerhet kring i hur stor utsträckning höghastighetsfenomenet behöver analyseras. Det har som sagt inte heller gått att dra någon som helst slutsats utifrån de utförda intervjuerna angående ifall det går att bortse från dynamiska last vid stora bankhöjder. Höga banker ses som mer konservativa med avseende på dynamisk påverkan men även andra faktorer kan ha för stor betydelse för att dra någon sådan slutsats.

5.1.4 Validering

För statiska sättningsberäkningar har det diskuterats att i och med att konstruktionen är mycket sättningskänslig blir det extra viktigt att säkerställa att sättningarna har utvecklats tillräckligt innan spåret läggs på plats och banan tas i bruk. Detta görs genom att jämföra uppmätta sättningar vid olika tidpunkter med den prognos man har för att säkerställa att prognosen stämmer tillräckligt bra. Detta är inte på något sätt något nytt.

En annan del som kan valideras är modelleringen av lasten som fås från tågtrafiken. Det har i intervjuerna framkommit att detta är något man redan arbetar med när det gäller järnvägsbroar och analyser av spårkonstruktionen. De intervjuade upplever att liknande metoder mycket väl kan användas för geotekniska tillämpningar.

Slutligen har att bygga en provbank för höghastighetsprojektet varit ett återkommande ämne. Flera av de intervjuade uttrycker att mätningar i full skala på något ”verkligt” är det absolut bästa för att validera en beräkningsmodell. Provbanken nämns som alternativ både för att validera sättningsberäkningar och dynamiska beräkningar med mera. Den allmänna uppfattningen verkar vara att provbank hade varit önskvärt i höghastighetsprojektet, trots kostnaden det innebär.

5.2 Metoddiskussion

Resultatet baseras på ett begränsat antal intervjuer där olika tankar och åsikter har framkommit. Det kan givetvis finnas andra tankar och idéer som inte har lagts fram här och det kan också finnas de som inte delar de uppfattningar som beskrivs. Intervjuerna har gett ett resultat som på en relativt övergripande nivå beskriver och sammanställer några uppfattningar i branschen.

När intervjustudien inleddes var frågeställningarna relativt öppna och bilden av vad som skulle komma att tas upp var begränsad. Detta gjorde att det blev kvalitativa intervjuer av en ganska låg strukturingsgrad. Det i sin tur har gjort att resultaten ligger på en förhållandevis övergripande nivå och det finns troligen många frågor där det är önskvärt med en djupare analys och mer konkret slutsats. Det är dock inte något som rymts i detta examensarbete.

Resultatet har givetvis också påverkats av erfarenheten och kunskapen hos dem som ställt upp på intervjuer. Detta har bidragit till att vissa frågeställningar har blivit besvarade i större utsträckning än andra.

5.3 Slutsatser

- Finita elementprogram (alternativt finita differensprogram) anpassade för geotekniska tillämpningar ses av de flesta som det bästa alternativet för sättningsberäkningar eftersom sådana analyser kräver anpassade materialmodeller.
- Dynamiska beräkningar syftar främst till att bedöma risken för att ett resonansfenomen uppstår och säkerställa att det finns en tillräcklig säkerhetsmarginal mot detta.
- Om man kan motivera att tilläggsspänningar från dynamiska laster är tämligen linjära går det att förenkla de dynamiska analyserna till att vara linjärelastiska.

- För linjärelastiska dynamiska beräkningar anges finita elementprogram som det bästa alternativet. Här blir det dock inte nödvändigt med program för geotekniska tillämpningar så länge modellen är linjärelastisk. Tvärtom finns det en uppfattning om att vissa generella FEM-program hanterar den typen av analys bättre.
- Det är möjligt att genomföra geotekniska icke-linjära, dynamiska analyser men kunskapen och erfarenheten av det är begränsad. Baserat på intervjuerna i det här examensarbetet upplevs det inte vara nödvändigt med den typen av analyser.
- En vanlig uppfattning är att det till stor del är upp till beräkningsingenjörers kunskap och preferens vid val av programvara.
- Det råder en osäkerhet kring i hur stor utsträckning dynamiska effekter och höghastighetsfenomenet bör beaktas.
- Det verkar helt saknas en gemensam strategi för hur man ska arbeta med sättningsanalyser och dynamiska analyser.
- Utifrån vad som framkommit i intervjuerna verkar det inte vara möjligt att dra någon slutsats om vid vilken bankhöjd det går att bortse från dynamiska last.
- Många tycker att en provbank är ett bra alternativ i höghastighetsprojektet för att kunna validera beräkningar.

5.3.1 Rekommendationer och fortsatta studier

Utifrån vad som framkommit i det här arbetet görs bedömningen att en första utgångspunkt kan vara att såväl sättningsberäkningar som dynamiska analyser är lämpliga att utföra i FEM- eller FDM-program. Något att utreda vidare är ifall det finns några sådana program som lämpar sig bättre än andra med avseende på exempelvis materialmodeller och hur programmet hanterar dynamiska analyser. Det skulle kunna uppnås genom att göra en mer utförlig sammanställning vad de olika programvarorna klarar av och erbjuder för funktioner.

Det verkar råda en osäkerhet kring i hur stor utsträckning de dynamiska effekterna och risken för att höghastighetsfenomenet uppstår ska utredas. Det skulle behöva fastställas ett systematiskt tillvägagångssätt eller riktlinjer för dessa analyser. Utifrån de intervjuer som genomförts i det här arbetet verkar även insikten i hur de har gått till väga internationellt med sådana frågor vara begränsad. Även det kan vara av intresse att utreda.

Med tanke på hur långt höghastighetsprojektet har kommit rekommenderas att Trafikverket lägger fram någon typ av gemensam strategi för hur man ska arbeta med sättningsanalyser och dynamiska analyser. För byggindustrin är det också av intresse att konkreta sättningskrav för höghastighetsbanans banunderbyggnad och undergrund tas fram angivet i millimeter eller liknande.

6 Referenser

- Andréasson, B. (2010). *Rapport: Höghastighetsjärnväg med tåghastighet högre än 320 km/h. Studie av höghastighetsrelaterade spår- och omgivningvibrationer*. Göteborg: WSP Samhällsbyggnad.
- Ansys Inc. (2015). Structures. (Elektronisk) Tillgänglig: <<http://www.ansys.com/products/structures>> (2017-04-19)
- Ansys Inc. (2017). Products. (Elektronisk) Tillgänglig: <<http://www.ansys.com/products>> (2017-04-19)
- Avdelning Teknik Sektion Väg- och Geoteknik. (1995). *Allmän teknisk beskrivning bankpålning*. Borlänge: Vägverket.
- Brinkgreve, R., Kumarswamy, S., & Swolfs, W. (2016). *PLAXIS 2016*. Delft: PLAXIS bv.
- Brinkmann, S., & Kvale, S. (2015). *InterViews- Learning the craft of qualitative research interviewing* (3:e uppl.). SAGE publications, Inc.
- Bårström, S., & Granbom, P. (2012). *Den svenska järnvägen*. Borlänge: Trafikverket.
- Comsol Inc. (2017a). Comsol Multiphysics. (Elektronisk) Tillgänglig: <<https://www.comsol.com/comsol-multiphysics>> (2017-04-19)
- Comsol Inc. (2017b). Geomechanics Module. (Elektronisk) Tillgänglig: <<https://www.comsol.com/geomechanics-module>> (2017-04-19)
- Eriksson, L., & Lennefors, L. (2015). *RAPPORT Utbyggnadsstrategier och förhandlingsunderlag för höghastighetsjärnvägar*. Trafikverket.
- Esveld, C. (2001). *Modern Railway Track*. Zaltbommel: MRT-productions.
- Gautier, P.-E. (2015). Slab track: Review of existing systems and optimization potentials including very high speed. *Construction and Building Materials*.
- Helwany, S. (2007). *Applied soil mechanics with ABAQUS applications*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Itasca Consulting Group, Inc. (2017a). Distinct Element Method. (Elektronisk) Tillgänglig: <<http://www.itascacg.com/software/pfc/distinct-element-method>> (2017-04-18)
- Itasca Consulting Group, Inc. (2017b). FLAC Version 8.0 Explicit Continuum Modeling of Non-linear Material Behavior in 2D. (Elektronisk) Tillgänglig: <<http://www.itascacg.com/software/flac> den 23 02 2017> (2017-02-23)
- Itasca Consulting Group, Inc. (2017c). PFC Version 5.0. (Elektronisk) Tillgänglig: <<http://www.itascacg.com/software/pfc>> (2017-04-18)
- Karlsson, R. (2014). *Teknisk systemstandard för höghastighetsbanor*. Trafikverket.
- Lennefors, L. (2010). *Internationell omvärldsanalys - Höghastighetsprojektet 30 september 2010*. Malmö: Trafikverket.
- Lennefors, L. (2016). *Trafikeringsrapport - Trafikering höghastighetsjärnväg i olika tidsperspektiv*. Trafikverket.

- Lichtberger, B. (2011). *Track Compendium- track system, substructure, maintenance, economics*. Hamburg: DVV Media group & Eurailpress.
- Luleå tekniska högskola. (2015). *Höghastighetsspår i Sverige - på bank. Projekt A2014:13*. Luleå: Trafikverket: BIG- branschsamverkan i grunden.
- Olsson, H., & Sörensen, S. (2011). *Forskningsprocessen - Kvalitativa och kvantitativa perspektiv* (3:e uppl.). Stockholm: Liber AB.
- PLAXIS. (2016a). *PLAXIS 2D Reference Manual*. PLAXIS.
- PLAXIS. (2016b). *PLAXIS Material Models Manual*. PLAXIS.
- Schanz, T., Vermeer, P., & Bonnier, P. (1999). The hardening soil model: Formulation and verification. *Beyond 2000 in Computational geotechnics*.
- Siemens. (2014). Simcenter - NX nastran Brochure. (Elektronisk) Tillgänglig: <http://www.plm.automation.siemens.com/se_se/products/simcenter/intro/index.shtml> (2017-04-19)
- Simulia. (2017). Abaqus theory guide. (Elektronisk) Tillgänglig: <<http://abaqus.software.polimi.it/v6.14/books/stm/default.htm?startat=ch02s08.html#stmporousmediachap>> (2017-03-21)
- Sällfors, G. (2009). *Geoteknik - jordmaterial, jordmekanik* (4:e uppl.). Göteborg.
- Sällfors, G., & Alén, C. (2009). Lime/Cement columns. i *Grundläggningsteknik VTGF01* (ss. 85-114). Lund: Institutionen för byggvetenskaper, LTH.
- Wersäll, C., & Larsson, S. (2015). *Vibrationer vid höghastighetsjärnväg - påverkan på grundläggningkonstruktioner*. BIG- Branschsamverkan i grunden.
- ZSOIL. (2015). ZSOIL.PC 2016. (Elektronisk) Tillgänglig: <<http://www.zsoil.com/zsoil/>> (2017-03-20)

Bilaga A – Underlag för intervju

Följande information fick samtliga intervjupersoner ta del av några dagar innan intervjun och det låg till grund för en del av det som diskuterades:

Info om exjobbet

I arbetet med de svenska höghastighetsbanorna har det dykt upp en del frågetecken gällande hur man bör utföra bärighets- och sättningsberäkningar. Det har beslutats att höghastighetsjärnvägen ska utformas med någon typ av fixerat spår vilket innebär att det kommer ställas mycket höga krav på att begränsa sättningarna. Tidigare har det diskuterats ifall hela sträckan skulle byggas på en landbro men nu är det beslutat att den till största del kommer byggas på bank/i skärning, med nödvändig markförstärkning.

Höghastighetstågen kommer ha en hastighet på 320 km/h men banan ska antagligen dimensioneras för ännu högre hastigheter på upp mot 350–400 km/h för att den i framtiden ska kunna klara dessa hastigheter.

Det här exjobbet utreder vilka beräkningsprogram som kan användas för att beräkna spänningar, töjningar och deformationer i undergrunden och banunderbyggnaden och vilka materialmodeller som är lämpliga. Vilka förenklingar kan accepteras och vilka för- och nackdelar finns det med de olika alternativen?

I och med den höga hastigheten har det också väckts frågor om i vilken utsträckning man behöver ta hänsyn till dynamiska effekter. För järnväg med konventionell hastighet bortser man från de dynamiska lasterna från tågtrafiken för den här typen av beräkningar men det är oklart vilken betydelse dessa har när hastigheten ökar. Det finns funderingar kring höghastighetsfenomenet (resonans) som riskerar uppkomma när tåghastigheten närmar sig markens skjuvvågshastighet/vägutbredningshastigheten i marken. Frågan är här vilka dynamiska programvaror som kan vara användbara och vad dess kan tillföra. Går det att helt bortse från dessa effekter och i sådana fall när?

Exjobbets frågeställningar:

- Vilka befintliga programvaror kan vara lämpliga att använda sig av i arbetet med höghastighetsbanorna?
- Vid vilken bankhöjd går det att bortse från inverkan av dynamisk last?
- Vad kan dynamiska programvaror tillföra?
- Hur kan beräkningarna valideras?

Bilaga B - Intervjufrågor

Nedan presenteras ämnesområden som diskuterats i samtliga intervjuer och exempel på intervjufrågor ges. Alla frågor här har dock inte ställts under samtliga intervjuer utan det har varierat något från gång till gång. Även i vilken ordning ämnesområdena har diskuterats och i vilken ordning intervjufrågorna har ställt har varierat. Det har också förekommit följdfrågor och liknande som inte presenteras här.

1. Förutsättningar

- Vad är de största skillnaderna mot vanlig järnväg?
- Vilka effekter är viktiga att beakta vid högre hastigheter?
- Hur anser du att sättnings- och bärighetsberäkningar för höghastighetsbanorna bör skilja sig från banor med konventionell, lägre hastighet?

2. Dynamiska effekter

- Anser du att man behöver beakta dynamiska effekter och vågutbredning? Varför/varför inte?
- Finns det situationer då du anser att man kan bortse helt från dynamiska effekter?
- Finns det några andra effekter som du anser är viktiga att beakta?

3. Programvaror

- Vilka programvaror tror du är lämpliga för att beräkna spänningar, töjningar och deformationer i järnvägsbank och undergrund för höghastighetsbanorna? Såväl statiska som dynamiska?
- Vilka för- och nackdelar ser du med de nämnda programmen?
- Vad ser du främst att de dynamiska programmen tillför?
- Är det något speciellt som är viktigt att vara medveten om man skulle använda dessa programvaror för beräkningar av höghastighetsbanan?

4. Validering

- Hur ser du att man kan validera beräkningarna? Ser du några svårigheter? Ser du något speciellt som är viktigt att tänka på?
- Vad känner du till för tillgängliga metoder som kan vara lämpliga för att validera indata?