

Sveriges nya kontaktledningssystem

- En jämförelsestudie av äldre
kontaktledningssystem, det nya svenska systemet
och befintliga system i Europa.



LUNDS
UNIVERSITET

Lunds Tekniska Högskola

LTH Ingenjörshögskolan vid Campus Helsingborg
Teknik och samhälle

Examensarbete:
Micael Appelholm
Gustaf Larsson

© Copyright Micael Appelholm, Gustaf Larsson

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

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

Tryckt i Sverige
Media-Tryck
Biblioteksdirektionen
Lunds universitet
Lund 2021

Sammanfattning

I Sverige planeras det för höghastighetsjärnvägar, med högre hastigheter än vad som används idag, för att binda samman landets tre storstadsregioner. I samband med detta krävs ett utvecklingsarbete av olika järnvägstekniska lösningar där kontaktledning är ett av områdena som utvecklas för att möta högre hastighetskrav. Detta examensarbete syftar på att analysera och jämföra olika kontaktledningssystem mot varandra samt belysa vilka aspekter som är viktiga vid framtagande av ett kontaktledningssystem. Arbetet har utgått från följande frågeställningar:

- Vilka krav har Trafikverket haft för ett nytt kontaktledningssystem?
- Vilka likheter samt för- och nackdelar har Trafikverkets nya system kontra andra, internationella system?
- Vilka motiv har Trafikverket haft för att välja att göra ett eget system?
- Vad är det som gör att det befintliga SYT 15/15-systemet inte räcker för att nå målhastigheten för Sveriges planerade höghastighetsbanor?
- Vilka tekniska begränsningar, avseende på största tillåtna hastighet, finns i ett kontaktledningssystem?

Datainsamlingen för den utförda studien har skett genom en litteraturstudie samt genom intervjuer. Litteraturstudien bestod av olika aktörers systembeskrivningar tillsammans med utbildningsmaterial på området, handböcker, föreskrifter, standarder samt nationella och internationella krav. Respondenterna till intervjuerna är yrkesverksamma inom förvaltning, utveckling samt projektering av kontaktledning och besitter stor kunskap på området. Den utförda litteraturstudien har sedan vävts samman med respondenternas svar för att ge underlag till examensarbetets analys och slutligen författarnas slutsats.

Arbetet visar att en rad olika parametrar spelar in på hur ett kontaktledningssystem beter sig i högre hastigheter och att det i och med detta blir en balansgång kring materialval för systemen. Studien visar även på fördelar med Trafikverkets val att utveckla ett eget kontaktledningssystem istället för att köpa in ett redan färdigt system. Vid framtagandet har andra internationella system fungerat som inspirationskälla. Att ta fram ett eget system gör att man äger systemet och därigenom ställa egna krav på vad systemet ska klara av. Studien visar att de tekniska begränsningar som finns i ett kontaktledningssystem bygger på en komplex blandning av olika parametrar.

Nyckelord: *Kontaktledning, kontaktledningssystem, höghastighetsjärnväg*

Abstract

Sweden is planning for highspeed railway with higher speed than used today between the country's three large metropolitan regions: Stockholm, Gothenburg and Malmö. In connection with this, various technical solutions, where the overhead catenary system is one area, must be developed further to meet higher speed requirements. This thesis aims to analyse and compare different catenary systems against each other and investigate which aspects are important in the development of a catenary system. The work has been based on the following research questions:

- What requirements has the Swedish Transport Administration had for a new catenary system?
- What are the similarities and advantages and disadvantages of the Swedish Transport Administration's new system compared to other, international systems?
- What motives has the Swedish Transport Administration had for choosing to make their own system?
- What in the existing SYT 15/15 system is not good enough to reach the target speed for Sweden's planned high-speed lines?
- What are the technical limitations regarding maximum allowed speed in a catenary system?

The data collection for the study was done through a literature study and through interviews. The literature study consisted of various manufacturers system descriptions together with educational materials in the field, manuals, regulations, standards as well as national and international requirements. The respondents to the interviews are professionals in management, development and design of catenary systems and have extensive knowledge in the field. The literature study performed has then been woven together with the respondents' answers to provide a basis for the degree project's analysis and finally the authors' conclusion.

This study shows that several different parameters affect how a catenary system behaves at higher speeds and that this in turn becomes a balancing act around the choice of material for the systems. The study also shows the advantages of the Swedish Transport Administration's choice to develop its own catenary system instead of purchasing an already developed system. During the development, other international systems have served as a source of inspiration. Developing your own system means that you own the system and thereby set your own requirements for what the system is supposed to handle. The study shows that the technical limitations that exist in a catenary system are based on a complex mixture of different parameters.

Keywords: *Catenary, catenary system, highspeed railway*

Förord

Detta examensarbete om 22,5 högskolepoäng avslutar författarnas högskoleutbildning i byggt teknik med inriktning järnvägsteknik vid Lunds Tekniska Högskola. Arbetet har pågått under våren 2021 i samarbete med ÅF Pöyry AB, AFRY. Båda författarna har varit närvarande vid samtliga arbetstillfällen och arbetsfördelningen för examensarbetet har varit jämn.

Efter att ha läst kurser inom flera järnvägstekniska områden växte författarnas intresse kring elteknik i allmänhet och kontaktledningsteknik i synnerhet något som lade grundstenen för idéskapandet kring examensarbetet. Idén som ligger till grund för examensarbetet har tagits fram av författarna tillsammans och sedan i samråd med handledare från AFRYs sida, Torbjörn Svensson, diskuterats fram till slutligt ämne.

Författarna vill tacka Torbjörn Svensson som varit en underbar resurs under examensarbetets gång med hjälp och stöttning kring frågor och kontaktvägar.

Vidare vill författarna även tacka Andreas Persson, Universitetsadjunkt vid institutionen för Trafik och Samhälle vid Lunds Tekniska Högskola som varit arbetets akademiska handledare och gett författarna värdefulla synpunkter samt goda råd kring rapportstruktur, litteratur, frågeställningar mm.

Ett stort tack till alla respondenter som ställt upp på intervjuer kring examensarbetet, utan dessa hade arbetet säkerligen aldrig kunnat färdigställas!

Slutligen vill författarna även rikta ett varmt tack till vänner och familj för stöd och värme, inte enbart under examensarbetet utan samtliga åren som studenter, tack!

Helsingborg, Maj 2021



Micael Appelholm



Gustaf Larsson

Preface

This degree project of 22.5 ECTS credit points concludes the authors' degree Bachelor of Science in Engineering, Civil Engineering with a focus on railway technology at Lund University. The work has been ongoing during the spring of 2021 in collaboration with ÅF Pöyry AB, AFRY. Both authors have been present equally and the division of work for the degree project has been even.

After reading courses in several areas of railway engineering, the authors' interest in electrical engineering in general and catenary engineering in particular grew, which laid the foundation for the subject of the degree project. The idea that forms the basis for the degree project has been developed by the authors together and then in consultation with the supervisor from AFRY, Torbjörn Svensson, discussed until its final topic.

The authors would like to thank Torbjörn Svensson who has been a wonderful resource during the degree project with help and support around questions and contact paths.

Furthermore, the authors would also like to thank Andreas Persson, Lecturer at the Department of Traffic and Society at Lund University, who has been the academic supervisor of the work and given the authors valuable views and advices on report structure, literature, issues etc.

A big thank you to all the respondents who took part in interviews about the degree project, without them the work would certainly never have been completed!

Finally, the authors would also like to extend a warm thank you to friends and family for support and warmth, not only during the degree project but during all the years as students, thank you!

Helsingborg, May 2021



Micael Appelholm



Gustaf Larsson

Definitioner och förkortningar

KTL	Förkortning för kontaktledning
RÖK	Räls Överkant, det mått som kontaktledningsprojektering utgår ifrån
S-räl	Sammanhängande räl som inte har några avbrott
STH	Största tillåtna hastighet
Spårmitt	Definieras som punkten mitt emellan rälerna
Strömavtagare	Anordning som överför ström från kontaktledning till fordon
SYT	Kontaktledningssystem med stavisolator, y-lina och tillsatsrör
TRVINFRA	Trafikverkets dokument för standarder och föreskrifter, tidigare TDOK
TSD	Tekniska specifikationer för driftskompatibilitet (Europeiska direktiv)
UIC	Union Internationale des Chemins de fer – Internationell organisation för järnväg

Innehållsförteckning

1 Inledning	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte och målsättning	2
1.3 Frågeställningar	2
2 Metod	3
2.1 Litteraturstudie	3
2.2 Utförda beräkningar	4
2.3 Intervjuer	4
2.4 Avgränsningar	7
3 Teori	8
3.1 Kontaktledningens traktionsmatning	8
3.2 Kontaktledningens uppbyggnad	9
3.3 Sektion	10
3.4 Stolpe	11
3.5 Upphängning av lina	12
3.6 Utliggare	14
3.7 Materialegenskaper för kontaktledning	16
4 Kontaktledningens egenskaper	19
4.1 Elasticitet	19
4.2 Vågutbredningshastighet	21
4.3 Dopplereffekt	21
4.4 Dopplerfaktor	22
4.5 Reflektionsfaktor	23
4.6 Förstärkningsfaktor	24
4.7 Vindhastighet och vindavdrift	24
5 Systembeskrivningar	26
5.1 Kravbild	26
5.2 SYT 15/15	28
5.3 SYT 21/27	29
5.4 Siemens SICAT HA	30
5.5 RPS TracFeed ALU 3000	31
5.6 Adif C-350	32
6 Analys av systemen	33
7 Resultat av egna beräkningar	38
7.1 Elasticitetsfaktor och vågutbredningshastighet	38
7.2 Dopplerfaktor, reflektionsfaktor samt förstärkningsfaktor ..	40
8 Intervjuer	43
8.1 Beskrivning av respondenter	43

8.2 Intervjusvar	44
9 Intervjuanalys.....	49
10 Resultat.....	50
11 Metoddiskussion.....	53
11.1 Litteraturstudie	53
11.2 Intervjuer	53
12 Framtida studier	54
13 Referenser	55
Figurförteckning.....	57
14 Bilagor	I
14.1 Bilaga I - Intervjufrågor till S1	I
14.2 Bilaga II - Intervjufrågor till S2.....	II
14.3 Bilaga III - Intervjufrågor till I1, I2 samt I3	III
14.4 Bilaga IV - Intervjufrågor till I4 samt I5.....	IV

1 Inledning

I detta kapitel beskrivs arbetets bakgrund, syfte, avgränsningar, frågeställningar samt metodik som använts för uppsatsen.

1.1 Bakgrund

Utvecklingen av järnvägssystem går ständigt framåt med eftersträvan mot högre hastigheter och driftsäkra system. Runt om i världen finns höghastighetståg som snabbt transporterar miljoner människor med hastigheter på upp till 430 km/h. Sverige har länge haft järnväg, de första linjerna började byggas redan på mitten av 1800-talet och spelar idag en viktig roll i landets transportsystem (Bårström & Granbom 2017).

Medan andra länder runt om i världen har tagit steget till höghastighetsbanor har istället Sverige valt att gå en annan väg. Idag har Sverige system som klarar hastigheter upp till 250 km/h (Trafikverket 2020a). För att möta framtiden kommer det att krävas system som klarar högre hastigheter med ökad kapacitet i det svenska järnvägsnätet.

Höghastighetsbanor är ett brett diskuterat ämne inom svensk infrastruktur och har sedan 2014, då regeringen tillsatte en kommission som kom att kallas för Sverigeförhandlingen, varit en het fråga för kommande infrastruktursatsningar (Sverigeförhandlingen 2017). För att få ner restiden mellan Stockholm-Göteborg/Malmö har höghastighetsjärnväg planerats som nya stambanor på nämnda sträckor. Anledningen till detta är för öka kapaciteten i det idag tungt belastade svenska järnvägsnätet, men även för att möta framtida mål om klimatsmart transport. Det sistnämnda då höghastighetståg är tänkt att konkurrera ut inrikesflyget och binda samman Sveriges tre storstadsregioner ytterligare.

I det tänkta förslaget för nya höghastighetsbanor i Sverige ska den nya anläggningen dimensioneras för hastigheter upp till 320 km/h, något som dagens svenska teknik inte klarar av då flertalet komponenter och system (såsom rälsisolering, växlar och kontaktledningssystem) endast är dimensionerade för hastigheter upp till 250 km/h (Sverigeförhandlingen 2017). Detta innebär att Trafikverket varit tvungna att förnya och utveckla bantekniska lösningar.

När det gäller kontaktledningssystem så finns det idag på den internationella marknaden flera system som klarar hastigheter över den tänkta hastigheten 320 km/h. Ett exempel på detta är det tyska systemet från RPS, TracFeed ALU3000, som är dimensionerat för hastigheter upp till 400 km/h.

Trafikverket har i sin planering inför de kommande höghastighetsbanorna utifrån sina befintliga kontaktledningssystem valt att vidareutveckla ett eget system, SYT 21/27, för att klara av hastigheter upp till 320 km/h. I denna rapport kommer denna process undersökas.

1.2 Syfte och målsättning

Syftet med denna jämförelsestudie är att analysera och diskutera skillnader mellan olika kontaktledningssystem för höghastighetsbanor för att utreda skillnader i funktion och uppbyggnad. Studien syftar till att belysa vilka tekniska aspekter som skiljer de olika systemen samt vad dessa aspekter har för roll i kontaktledningens uppbyggnad.

I denna uppsats kommer Trafikverkets tänkta nya kontaktledningssystem att analyseras och jämföras med både det äldre SYT 15/15-systemet samt ett antal internationella system för att kartlägga vad som skiljer de olika systemen åt och vad som gör att en ombyggnad av dagens system behövs för att klara högre hastigheter.

Rapportens målgrupp är personer verksamma inom järnvägsbranschen och studien syftar till att ge en fördjupad bild av Trafikverkets tillvägagångssätt utav framtagandet av det kommande kontaktledningssystemet för höghastighetsbanor.

1.3 Frågeställningar

Författarna har inför denna uppsats formulerat följande frågeställningar att besvara:

- Vilka krav har Trafikverket haft för ett nytt kontaktledningssystem?
- Vilka likheter samt för- och nackdelar har Trafikverkets nya system kontra andra, internationella system?
- Vilka motiv har Trafikverket haft för att välja att göra ett eget system?
- Vad är det som gör att det befintliga SYT 15/15-systemet inte räcker för att nå målhastigheten för Sveriges planerade höghastighetsbanor?
- Vilka tekniska begränsningar, avseende på största tillåtna hastighet, finns i ett kontaktledningssystem?

2 Metod

För att genomföra denna uppsats genomfördes en litteraturstudie samt intervjuer med personer som har bred erfarenhet och kunskap inom området. Då det nya systemet SYT 21/27 fortfarande är under utveckling när arbetet skrivs har författarna bedömt intervjuer som extra viktiga då dokumentationen på området succesivt uppdateras eller ersätts.

Arbetet med studien påbörjades med en litteraturstudie där fakta samlades in för grundläggande kontaktledningsteori, där även förfrågningar om systembeskrivningar skickades ut till olika förvaltare och tillverkare av olika system. Därefter togs, med hjälp av litteraturstudien, frågor till intervjuer fram och intressanta respondenter för studien valdes ut. Efter intervjuerna sammanställdes intervjusvar och egna beräkningar utifrån teorin utfördes. Därefter analyserades intervjusvar, systembeskrivningar samt egna beräkningar för att besvara de inledande frågeställningarna. Slutligen diskuterades författarnas egna slutsatser fram av, i studien, inhämtad information.

2.1 Litteraturstudie

Den litteratur som studeras är främst tekniska dokument från Trafikverket, så kallade TRVINFRA-dokument och dess föregångare TDOK, tillsammans med kravdokument och standarder. Även motsvarande teknisk dokumentation från övriga utvecklare av kontaktledningssystem för höghastighetssystem internationellt har analyserats. I litteraturstudien har även kursmaterial från Trafikverksskolan, tidigare Järnvägsskolan, samt ritningar för de olika systemen varit med och lagt grund för analyser och diskussioner.

Dokumentationen som studerats har fungerat som grund för att ge en grundläggande, korrekt fakta kring kontakledningsteori för läsaren men även fungerat som ett komplement samt verifieringssätt för de intervjuer som studien bygger på.

2.2 Utförda beräkningar

I studien presenterar författarna beräkningar som är tänkta att ge en bas för att jämföra och utvärdera olika parametrar som är viktiga för ett kontaktledningssystem. Beräkningar är utförda enligt tilldelade systembeskrivningar, författarnas tidigare kurslitteratur samt inhämtad teori från litteraturstudien.

En del beräkningar är förenklade för att ge författarna en chans att lättare förklara dessa för läsaren. Majoriteten av de värden som används är tagna från kända källor men det finns även med uppskattningar på de ställen där exakta värden saknas.

2.3 Intervjuer

Detta delkapitel beskriver arbetsmetoden kring framtagande, utförande samt sammanställning av de intervjuer som lagt grunden till studien.

Intervjumetod

Då respondenternas svar spelar stor roll för studiens resultat har de intervjuades namn valts att maskeras för att öka de intervjuades villighet att svara fritt (Patel & Davidsson 2011). Anonymiteten används i intervjuerna som incitament för respondenterna för att ge så utförliga svar som möjligt.

Intervjuerna bygger på frågor med olika grad av standardisering och strukturering med inslag av olika grader av öppna och stängda frågor (Patel & Davidsson 2011). Detta för att ge respondenterna möjlighet att i vissa frågor få ett bredare svarsutrymme, genom att medvetet ha en mer ostrukturerad intervju ges respondenten ett bredare utrymme att med egna ord besvara aktuell frågeställning.

Val av respondenter

Då det nya svenska kontaktledningssystemet fortfarande är under uppbyggnad har stort fokus lagts på intervjuer med nyckelpersoner som varit med och utvecklat systemet. De två svenska respondenterna som valts ut för intervju besitter båda stor kunskap kring framtagandet av SYT 21/27-systemet.

För att samtidigt få en bredare blick över internationella system har även fem representanter från den internationella marknaden inkluderats i intervjuprocessen. Personerna som intervjuas har valts utifrån deras positioner i organisationer och företag som projekterar, förvaltar, utvecklar samt har utvecklat kontaktledningssystem.

Inför intervju

Författarna diskuterade initialt tillsammans fram frågor tänkta att fylla ett så brett spektrum som möjligt utifrån utförd litteraturstudie och författarnas egna funderingar. Sedan rangordnades frågorna och de som ansågs mindre relevanta för fortsatt studie sållades bort. Detta för att effektivisera intervjutiderna och därmed få så skärpta och konkreta svar som möjligt. Slutligen valdes cirka 15 frågor ut som ansågs lämpliga för kommande intervjuer. Samtliga frågor, både generella och partspecifika presenteras i bilagor till studien.

De partspecifika frågor som togs fram för respondenterna syftar till att få mer inblick kring den intervjuades egna erfarenhet och kunskap. Detta då en del respondenter enbart besitter kunskap om egna system och således inte är insatta i frågor om konkurrerande system.

Under intervjuuppläggen bokades tider för intervjuer. Då rådande omständigheter med en global pandemi inte tillät fysiska möten togs beslut att använda sig av digitala medel för intervjuer. De program som använts för intervjuer har varit Microsoft Teams samt Zoom då författarna haft tillgång till dessa hjälpmedel. De internationella respondenterna intervjuades i grupper, först tre och sedan resterande två i två skilda intervjuer.

Respondenterna fick innan intervju en kort beskrivning om vad intervjun skulle handla om utskickade samt förfrågan huruvida författarna fick spela in intervjun eller inte. Samtliga intervjuer spelades in med programmet OBS Studio på en av författarnas datorer för att möjliggöra transkribering av samtalen och därigenom tillåta en bredare analys av intervjuvaren.

Anledningen till att frågorna inte skickades ut i förväg till respondenterna var för att författarna ansåg att intervjupersonen inte skulle ges en chans att besvara frågorna i förväg. Detta för att ge en mer öppen intervju samt att författarna ansåg att om frågorna skulle skickas ut i förväg bör de formuleras på ett specifikt sätt.

Under intervju

Intervjuerna inleddes med att författarna presenterade sig själva och förklarade kort vad examensarbetet handlar om samt vilka frågeställningar som de tänkt undersöka i studien. Därefter ställdes de inledande frågorna till respondenten som syftade på att få en bild på hur mycket erfarenhet respondenten har inom området och vilken roll denne besitter idag.

Efter det att författarna fått en klar bild på respondentens bakgrund ställdes partspecifika frågor som syftade på att få svar på de i studien satta frågeställningarna och på hur respondenten resonerar kring ämnet.

Avslutningsvis ställdes frågor som var inriktade till hur framtiden kan tänkas att se ut vad gäller kontaktledningssystem, detta för att få respondenternas syn på kommande utveckling inom kontaktledningsteknik.

Efter intervju

Efter perioden för intervjuer så har inspelat material analyserats och sammanfattats tillsammans med författarnas egna anteckningar.

Sammanfattningen har skett genom att jämföra och analysera svaren på de gemensamma frågorna för att sedan vägas in med de personspecifika frågor som ställts.

Intervjuarbetet avslutades med att framställa ett resultat genom att verifiera samt jämföra respondenternas svar tillsammans med inhämtad fakta från utförd litteraturstudie.

2.4 Avgränsningar

I denna studie presenteras en övergripande förklaring om tekniken bakom de svenska kontaktledningssystemen SYT 15/15 och SYT 21/27 som sedan jämförs med de internationella systemen Siemens SICAT HA, RPS TracFeed ALU3000 samt det spanska Adif C-350, inga andra system tas i beaktning. Maglevtekniken som är populärt i andra delar av världen kommer inte att ingå i denna jämförelsestudie då den tekniken saknar konventionell kontaktledning.

Studien kommer inte att behandla de ekonomiska aspekterna kring kontaktledning, detta då väldigt många parametrar styr över vad priset för att bygga en kontaktledning på olika sträckor blir.

Studien kommer endast behandla teknikområdet elkraftsteknik inom järnväg. Andra teknikområdens begränsningar, med avseende på STH, kommer inte tas i beaktning. Traktionsmatning innan den når kontaktledningen, hjälpkraftsledning, återledning och skyddsjordning kommer heller inte undersökas, dock beskrivas övergripande för att läsaren ska få en grundläggande förståelse kring området.

Väderförhållande som temperaturskillnader och vind tas upp i studien, dock ges inte någon djupgående analys kring meteorologiska aspekter.

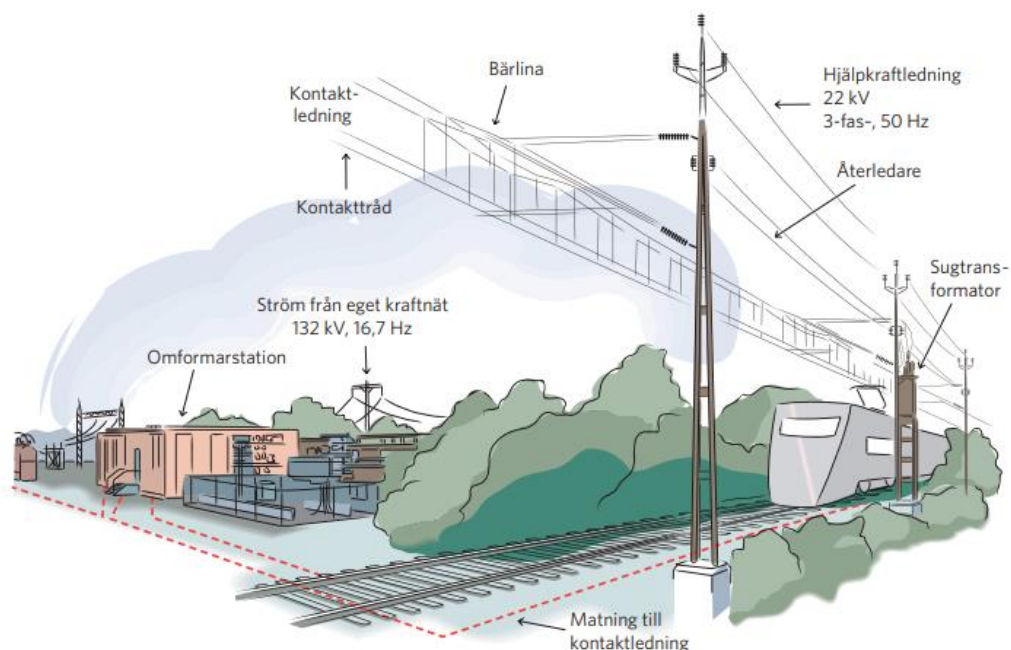
3 Teori

I detta kapitel beskrivs hur dagens svenska kontakledningssystem fungerar i teorin. Kapitlet syftar på att ge läsaren grundläggande teori inom ämnet som studien behandlar.

3.1 Kontaktledningens traktionsmatning

Järnvägsnätet förses med elkraft från elleverantör som levererar en spänning på 132 kV (Banverket 2006). Den inkommande elkraften transformeras sedan ner till rätt spänningsnivå med hjälp av transformatorer som finns placerade i omformarstationer. Inom järnväg används olika spänningar för olika användningsområden. Exempelvis använder hjälpkraftledningen en spänning på 22 eller 11 kV för att främst ge ström till signaler, växelvärmare och stationsbyggnader längs järnvägen.

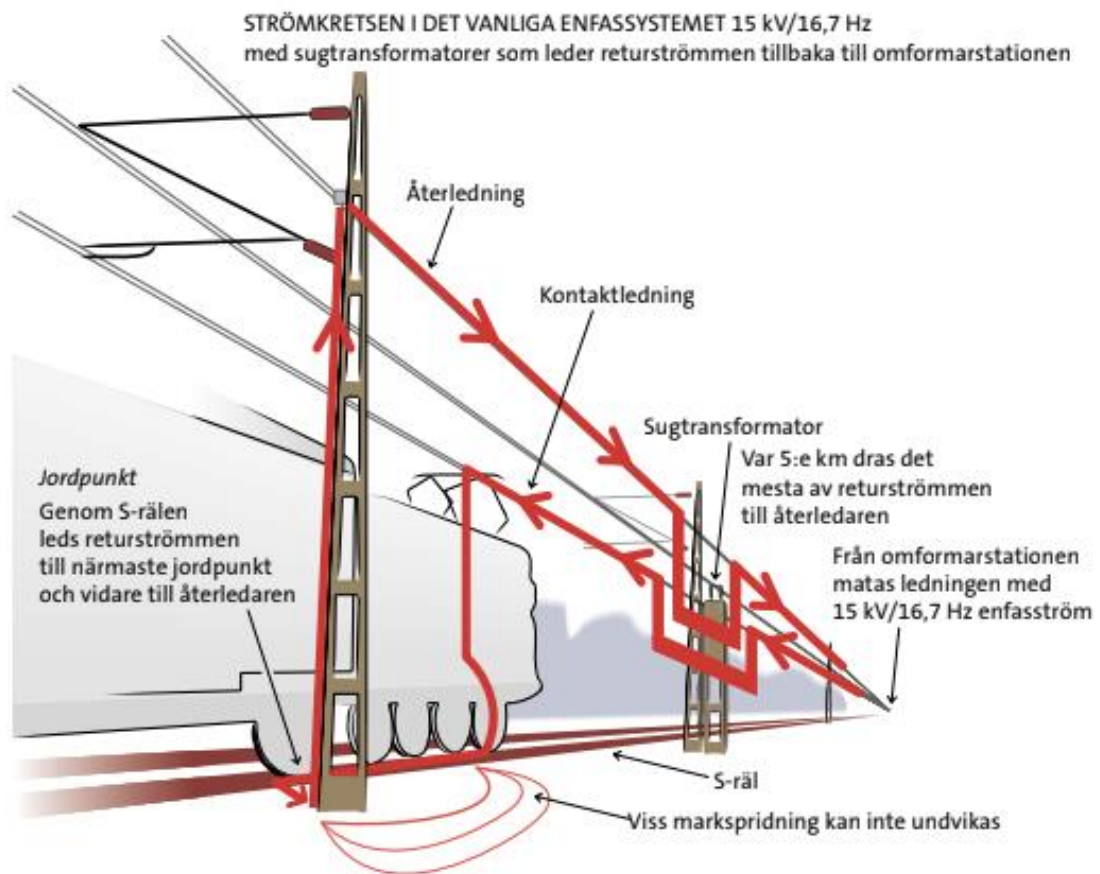
Från omformarstation matas kontaktledningen med en spänning på 16,5 kV (Banverket 2006). De eldrivna tågen får sin ström, se Figur 1, via kontaktledningen genom strömvtagaren som driver elmotorer sammankopplade med hjulaxlar.



Järnvägens elanläggningar.

Figur 1: Illustration på järnvägsnätets elförsörjning (Trafikverksskolan 2019)

Hjulen, som har kontakt med s-rälen fungerar som returkrets genom att via sugtransformatorer åter leda strömmen tillbaka till omformarstationen för att på så sätt bilda en sluten krets, se Figur 2 (Banverket 2006).



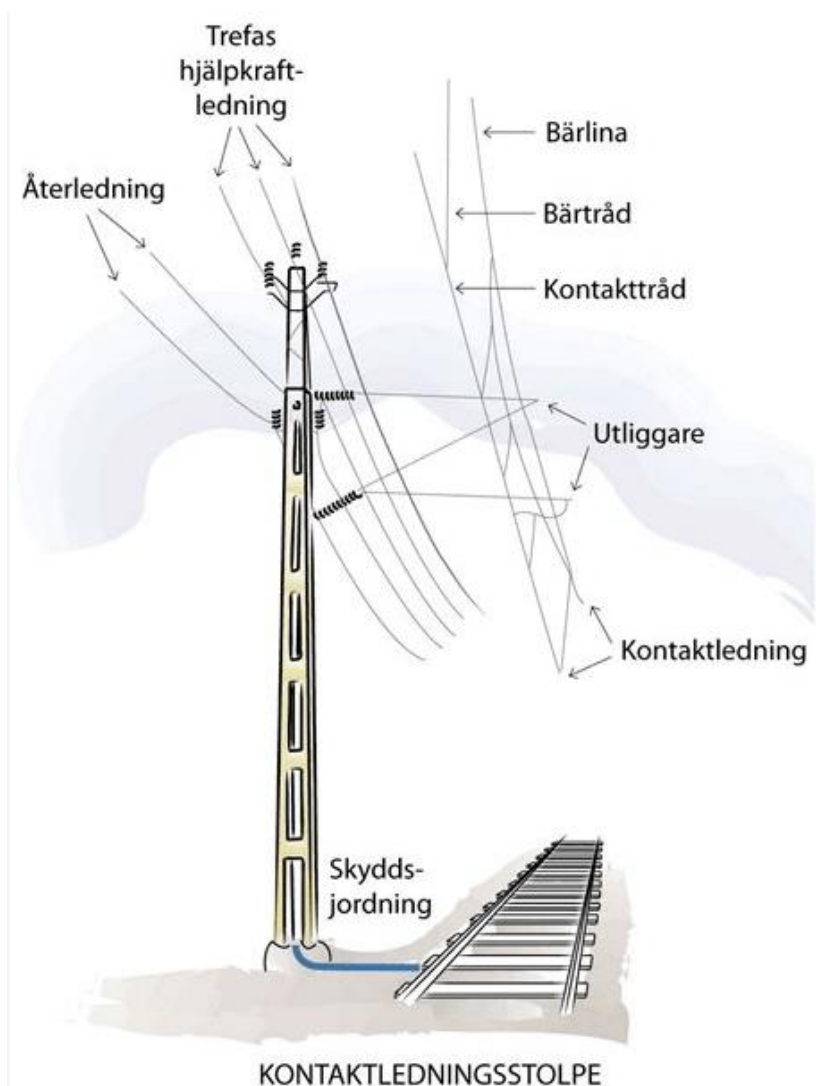
System med sugtransformator

Figur 2: Illustration på strömmens väg i en järnvägsanläggning (Banverket 2007)

3.2 Kontaktledningens uppbyggnad

I begreppet kontaktledning ingår fundament, stolpar, utliggare, bärlina, bärtråd, kontakttråd, viktavspänning, isolatorer, hjälpkraftsledning, förstärkningsledning, återledning mm (Järnvägskolan 2011a). Dess huvudsyfte är att leverera ström till elektriskt drivna järnvägsfordon via kontakttråden.

I Sverige används olika kontaktledningssystem där uppbyggnaden skiljer sig något. De största skillnaderna är linornas inspänningskrafter samt hur utformningen på bärlina och utliggare är konstruerad som i sin tur påverkar STH för anläggningen. I grunden är uppbyggnaden, se Figur 3, av systemen liknande.

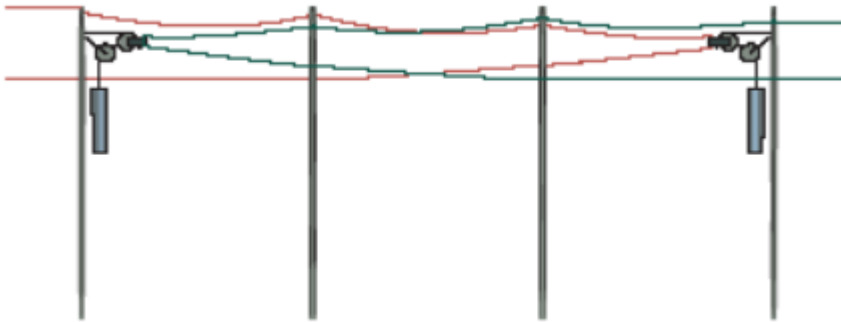


Figur 3: Uppbyggnad av kontaktledning (Trafikverksskolan 2019)

3.3 Sektion

Kontaktledningen längs spåret delas upp i sektioner som normalt är begränsade mellan 1200–1500 meter (Järnvägsskolan 2011a). Längdbegränsningen beror på längdutvidgningen på kontaktledningstråden som blir längre vid högre temperatur och kortare vid lägre temperatur. För att kompensera längdutvidgningen används viktavspänningar i varje ände av sektionen, vilket förklaras mer ingående i avsnittet upphängning av lina, kapitel 3.5. Varje sektionsavsnitt består av cirka 20 stolpar. I mitten av varje sektion finns en förankringspunkt av trådarna för att förhindra att kontaktledningen dras med av tågets strömavtagare.

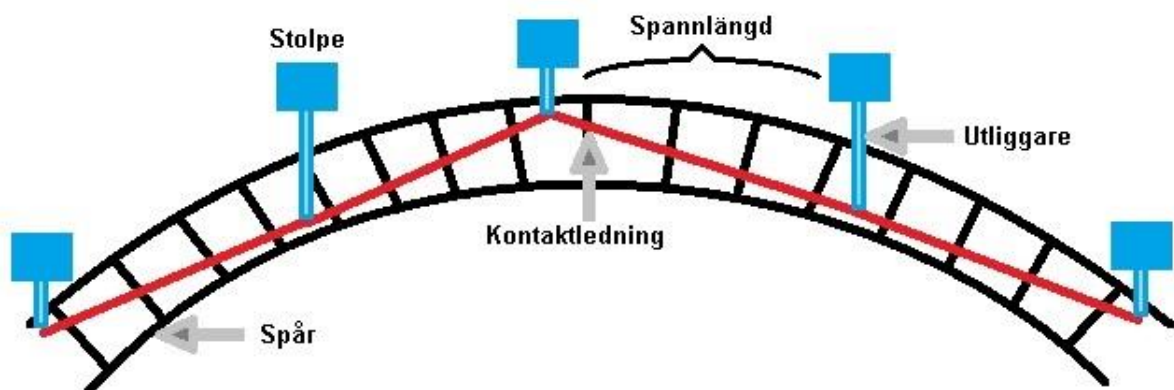
Mellan varje sektion finns en så kallad sektionspunkt där övergång mellan sektionernas ledningar sker (Järnvägsskolan 2011a). Sektionsbytet får körtråden att lyftas upp, se Figur 4, några centimeter som gör att strömavtagaren byter tråd till nästkommande körtråd. Detta sker genom att strömavtagaren har ett högt tryck uppåt mot ledningen. För högre hastigheter ökas längden på sektionspunkten för att få en mjukare övergång mellan sektioner. För höghastighetssystem används fem spannlängder vid sektionsövergången som begränsar sektionens längd till 1200 meter då sektionspunkten totalt blir 300 meter.



Figur 4: Inspänningsanordning vid sektionspunkt. (Trafikverksskolan 2019)

3.4 Stolpe

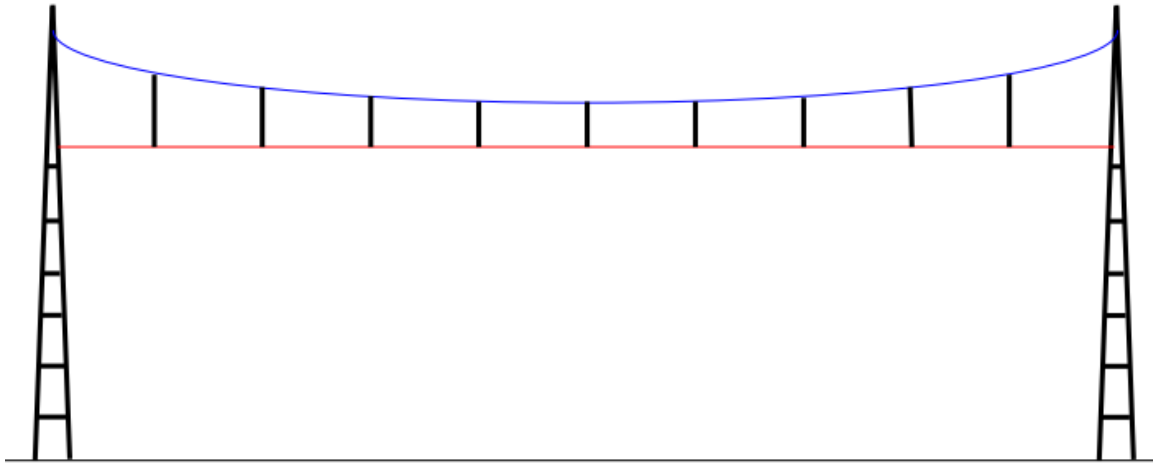
Avståndet mellan varje stolpe varierar med ett normalavstånd på 60 eller 65 meter beroende på vilket system som används (Banverket 2006). Avståndet mellan varje stolpe kallas spannlängd. Ibland kan spannlängden behöva minskas för att kontaktledningen ska kunna hållas ovanför fordonets strömavtagare. Detta krävs främst i kurvor och på områden som är vindkänsliga som broar och dylikt för att strömavtagaren inte ska vandra utanför kontaktledningen, se Figur 5. På stolpen finns så kallade utliggare som fungerar som upphängningspunkter till kontaktledning och bärlina. Istället för stolpar används ibland så kallade bryggor på stationer och bangårdar för att spara plats.



Figur 5: Illustration för spannlängdminskning i kurvor. (Appelholm, 2021)

3.5 Upphängning av lina

Kontaktledningen består av bärlina, bärtråd och kontakttråd, se Figur 6. För att få korrekt höjdläge på kontakttråden mellan stolpar används bärlina och bärtråd som fäste för att få kontakttråden helt rak, vilket i kombination med vikter spänner ut ledningarna (Bårström & Granbom 2017).

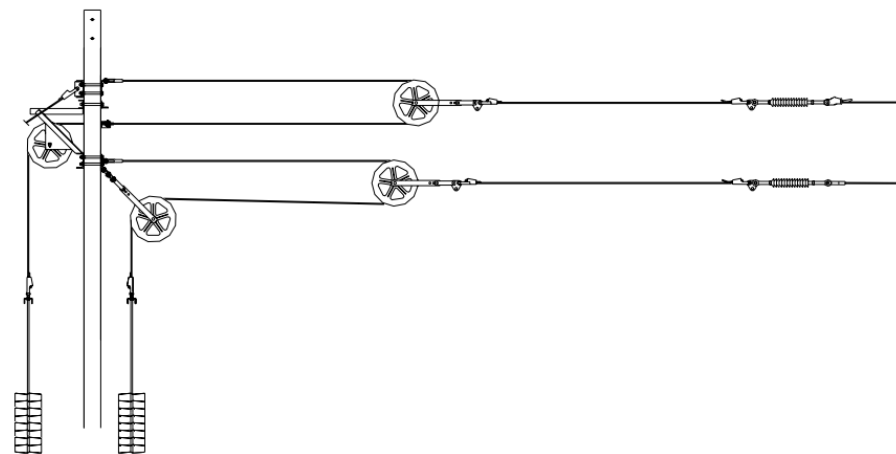


Figur 6: Illustration för funktionen av kontakttråd (röd), bärlina (blå) och bärtråd (svart) (Trafikverksskolan 2019)

Som nämnts i avsnitt 3.3 är viktavspänningen betydelsefull för att reglera kontaktledningens nedhäng som orsakas av temperaturskillnader.

Viktavspänning fungerar genom att, se Figur 7, i löphjul hänga vikter på båda sidor om en sektion (Banverket 2006). Dessa vikter vandrar upp och ner beroende på rådande temperatur; de vandrar uppåt när det är kallt och nedåt när det är varmt för att ge konstant inspänningskraft i ledningen och för att bibehålla samma prestanda oberoende av temperaturskillnaderna.

Inspänningskraften i ledningen beror på hur mycket vikt som hängs upp och hur många hjul avspänningslinan löper igenom.

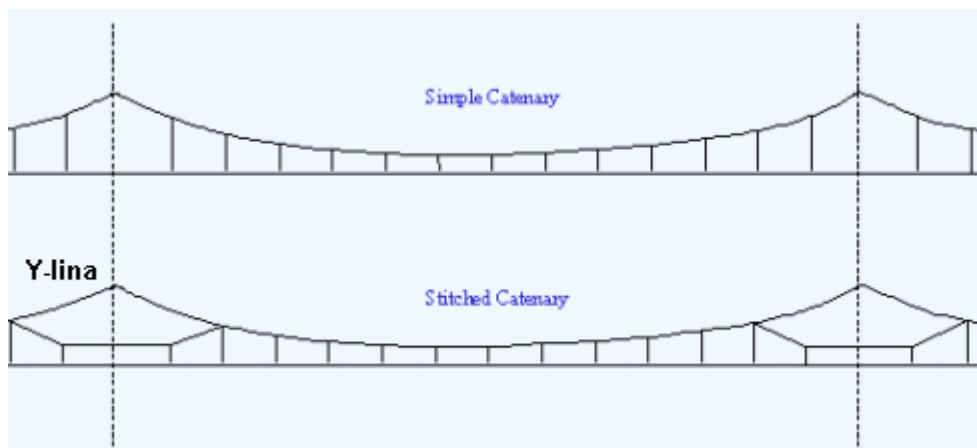


Figur 7: Illustration av separata viktavspänningar (Banverket 2006)

På system med hög inspänningskraft används utväxling i löphjulen som gör att det inte krävs lika mycket vikter för att få önskad inspänning (Järnvägsskolan 2011a). Detta leder dock till att vikterna rör sig mer vid temperaturförändringar i linan. Exempelvis om en 1:3 utväxling används i systemet behövs bara en tredjedel av vikten men det betyder också att vikten vandrar 3 gånger längre, vilket kan ställa till det på grund av det begränsade utrymmet vikterna kan vandra mellan.

Linornas inspänningskraft blir viktig när fordon framförs i högre hastigheter då ledningen får utstå större krafter från strömavtagaren (Banverket 2006). Upptryckskraften från strömavtagaren blir större desto snabbare tåget framförs vilket medför att höghastighetsbanor kräver högre inspänningskrafter. På nyare system används separata vikter för kontaktledning och bärlina för att uppnå högre inspänningskrafter.

I dagens höghastighetssystem används vid upphängningen av kontaktledningen en så kallad Y-lina som hängs upp i bärlinan och ansluter vid båda sidor om varje stolpes utliggare, se Figur 8 (Banverket 2006). Y-linans funktion är till för att ge en jämnare och mjukare gång över utliggare och bidrar med att minska kontakttrådens elasticitetskillnad i spannen.

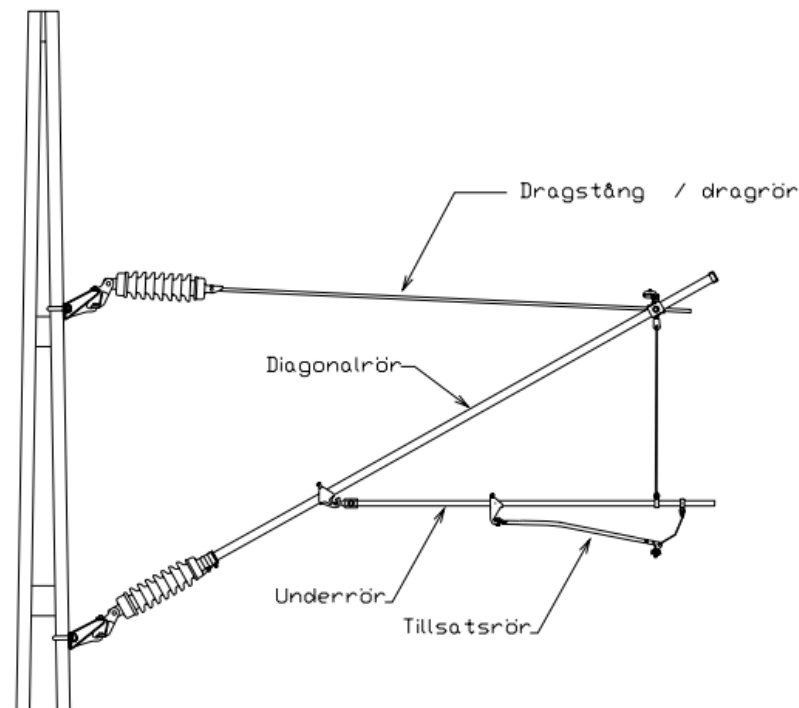


Figur 8: Illustration för funktionen av y-lina, streckad linje avser upphängningspunkt i utliggare. (Banverket 2006, modifierad av författarna)

3.6 Utliggare

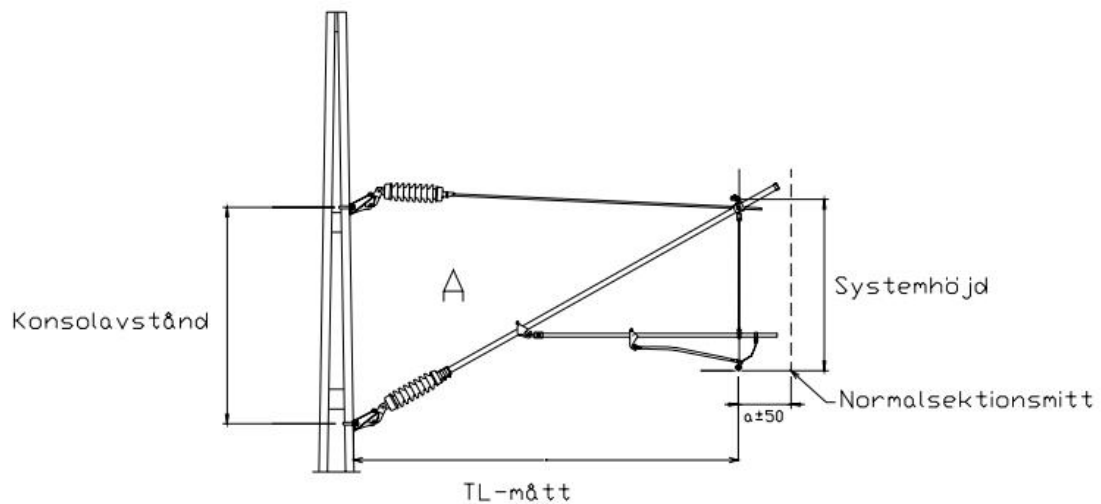
Utliggares funktion är att hålla kontaktledningen i rätt höjd- och sidoläge över spårmit (Järnvägsskolan 2011a). Konstruktionen består av rör och stänger med komponenter som isolatorer och olika hållare, se Figur 9. I dagens nyare system används stavisolatorer av komposit då de är mer hållbara än tidigare isolatorer av porslin.

I höghastighetssystem förses utliggare med ett så kallat tillsatsrör för att öka elasticiteten vid utliggaren samt minska den totala massan som tågens strömvagn behöver lyfta vid utliggarpassage (Banverket 2006).



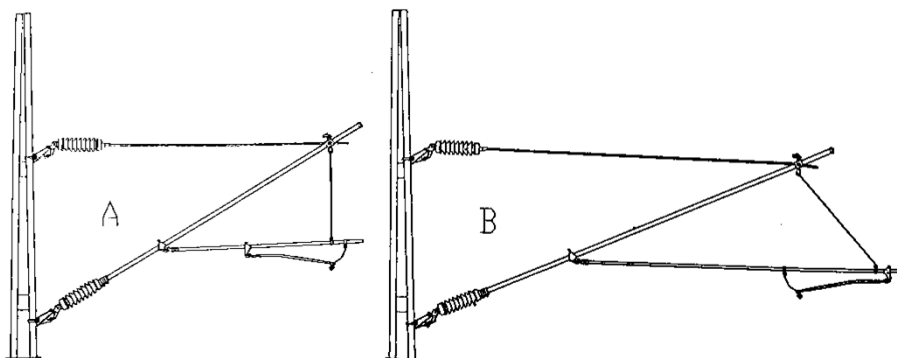
Figur 9: Utliggares uppbyggnad av rör- och stångkomponenter (Järnvägsskolan 2011a)

Utliggare har olika inställningsmått beroende på vilket system de ska anpassas för, se Figur 10. Systemhöjden är avståndet mellan kontakttråden och bärlinan (Järnvägsskolan 2011a). TL-måttet är det mått som anger kontaktledningens läge gentemot stolpe, i Figur 10.



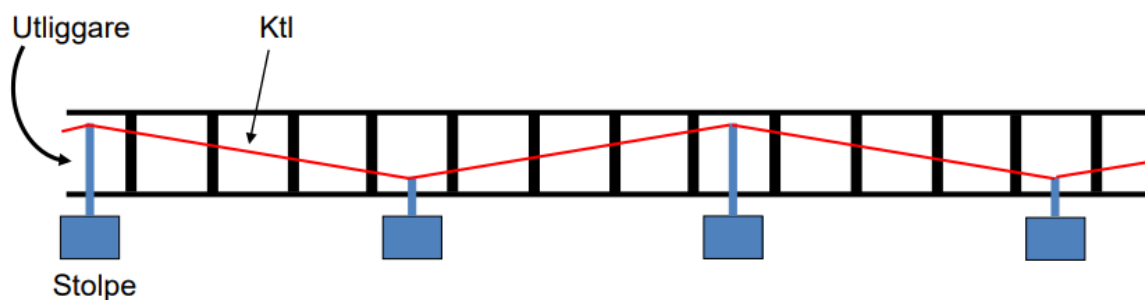
Figur 10: Utliggare med måttangivelser (Banverket, 2006)

Det finns flera utföranden av utliggare och de som monteras mellan sektionsspunkter finns i utförande A som är korta och i utförande B som är långa, se Figur 11.



Figur 11: Skillnad i utförande av utliggare (Järnvägsskolan 2011a)

Utliggare av typ A drar kontaktledningen mot stolpen medan utliggare av typ B trycker ut kontaktledningen från stolpen som tillsammans gör att kontaktledningen vandrar från sida till sida från spårmittpunkt som skapar en sicksacklinje, se Figur 12 (Järnvägsskolan 2011a). Detta görs för att slitaget på strömvagnens kolslitskenor ska bli jämnt fördelat över hela dess kontaktyta.



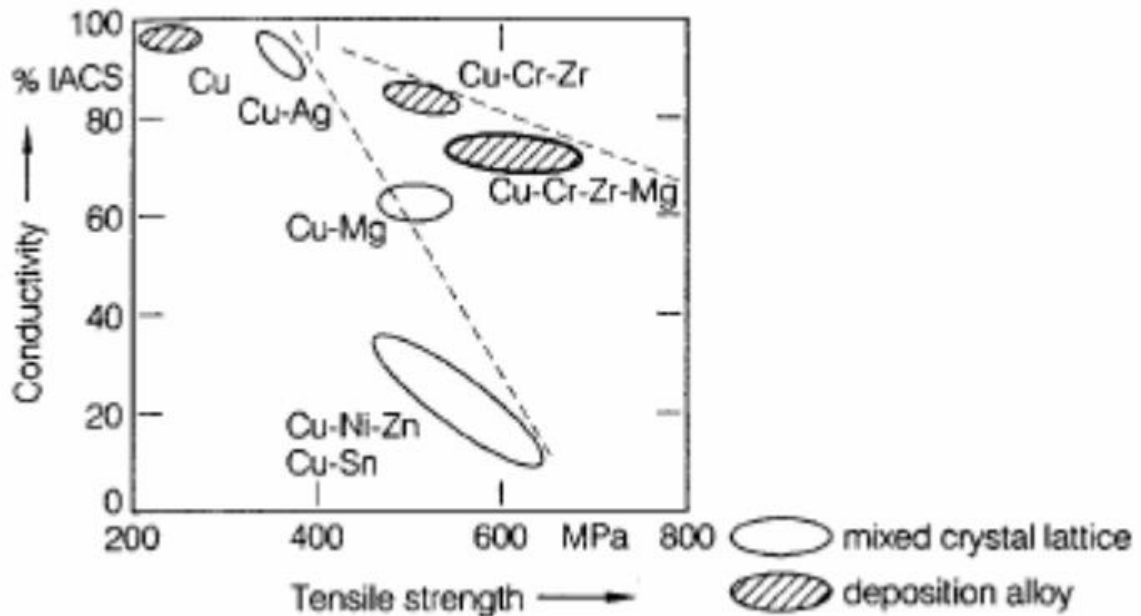
Figur 12: Illustration av sicksackmönster som utliggare skapar (Trafikverksskolan 2019)

Vid sektionsovergångar är utliggare utformade för att klara av att hålla två kontaktledningar samtidigt (Järnvägsskolan 2011a). Dessa utliggare finns i fyra utföranden och fungerar funktionsmässigt på liknande sätt som utliggare av typ A och typ B, med skillnaden att den ena utliggaren lyfter upp kontaktledningen och sedan styr ledningen vidare in till viktavspänning. Det finns två olika typer av sektionsutliggare: C/F som trycker de två ledningarna från stolpen och D/E som drar de två ledningarna mot stolpen, likt vanliga linjeutliggare.

3.7 Materialegenskaper för kontaktledning

Vid val av kontaktledningsmaterial är det viktigt att hitta ett material med bra ledningsförmåga och hög brottgräns (Banverket 2006). Det ställer höga krav på ledningens kvalitet som ska kunna leda ström utan större förluster samt tåla stora inspänningskrafter och inte slitas ner avsevärt av friktionen mellan kontakttråd och strömavtagare. Med dessa kriterier i åtanke var alla kontaktledningar förr bestående av ren koppar. Det visade sig dock att vid ökade inspänningskrafter var ren koppar ett för mjukt material för att tåla de inspänningskrafter som dagens system kräver.

För att komma ifrån tillämpningen av ren koppar har den helt ersatts eller blandats till en legering med andra material, se Figur 13. Legeringen ger liknande ledningsförmåga men med bättre draghållfasthet (Banverket 2006). I kontaktledningssystem är generellt sett kontakttråd, bärlina och bärtråd av kopparlegering medan övriga ledare numera är av ren aluminium eller aluminium i kombination med stål.



Figur 13: Materialegenskaper på kopparlegeringar för brottgräns i x-led och ledningsförmåga i förhållande till ren koppar i y-led (Banverket 2006)

Det är även viktigt att hitta ett material som har låg vikt eftersom det eftersträvas en kontakttråd med hög vågutbredningshastighet för att kunna framföra tåget snabbare (Banverket 2006). Ökad tvärsnittsarea ger bättre elektriska egenskaper samt högre draghållfasthet men gör också tråden tyngre. De vanligaste kontakttrådarna och bärlinorna för höghastighetssystem presenteras närmare i Tabell 1 och Tabell 2. De viktigaste kriterierna för en kontakttråd är att det ska vara lätt, ha hög draghållfasthet samt ha hög ledningsförmåga för att få en hög vågutbredningshastighet.

Vågutbredningshastigheten i systemet förklaras mer ingående i kapitel 4.2.

Material	Kemisk beteckning	Tvårsnittsbarea [mm ²]	Nominell vikt [kg/km]	Minsta brottgräns [MPa]	Minsta brottsbelastning [kN]	Ledningsförmåga [% IACS]
Koppar-silver	CuAg 0.1	120	1070	350	40,7	≥ 97
Koppar-magnesium	CuMg 0.5	120	1070	490	57,0	≥ 62
Koppar-magnesium	CuMg 0.5	100	890	510	49,5	≥ 62
Koppar-magnesium	CuMg 0.5	150	1374	470	68,4	≥ 62

Tabell 1: Ledningsfakta för olika kontakttrådsmaterial enligt EN 50149. (Elcowire rail, 2020) (SIS 2012)

Siffran i kemisk beteckning anger mängd legeringsprocent, ju större tal desto mer mängd. Exempelvis CuAg0.1 betyder kopparsilverlegering med 99,9% koppar och 0,1% silver (European copper institute u.å).

Material	Beteckning	Tvårsnittsbarea [mm ²]	Nominell vikt [kg/km]	Kalkylerad brottsbelastning [kN]
Brons	Bz	70	596	32,51
Brons	BzII	120	1060	67,57
Brons	BzII	95	845	54,76
Koppar	Cu	95	845	37,39

Tabell 2: Ledningsfakta för olika bärlinsmaterial. (Elcowire rail, 2020)

4 Kontaktledningens egenskaper

Olika kontaktledningssystem skiljer sig i uppbyggnad vad gäller exempelvis inspänningskrafter och materialval så som presenterats i kapitel 3. Av de olika val av inspänningskrafter och linor som görs för ett system fås sedan en del parametrar som för varje system blir specifika. I detta kapitel beskrivs några av de vanligaste karaktär dragen som utreds och beräknas vid framtagandet av ett kontaktledningssystem.

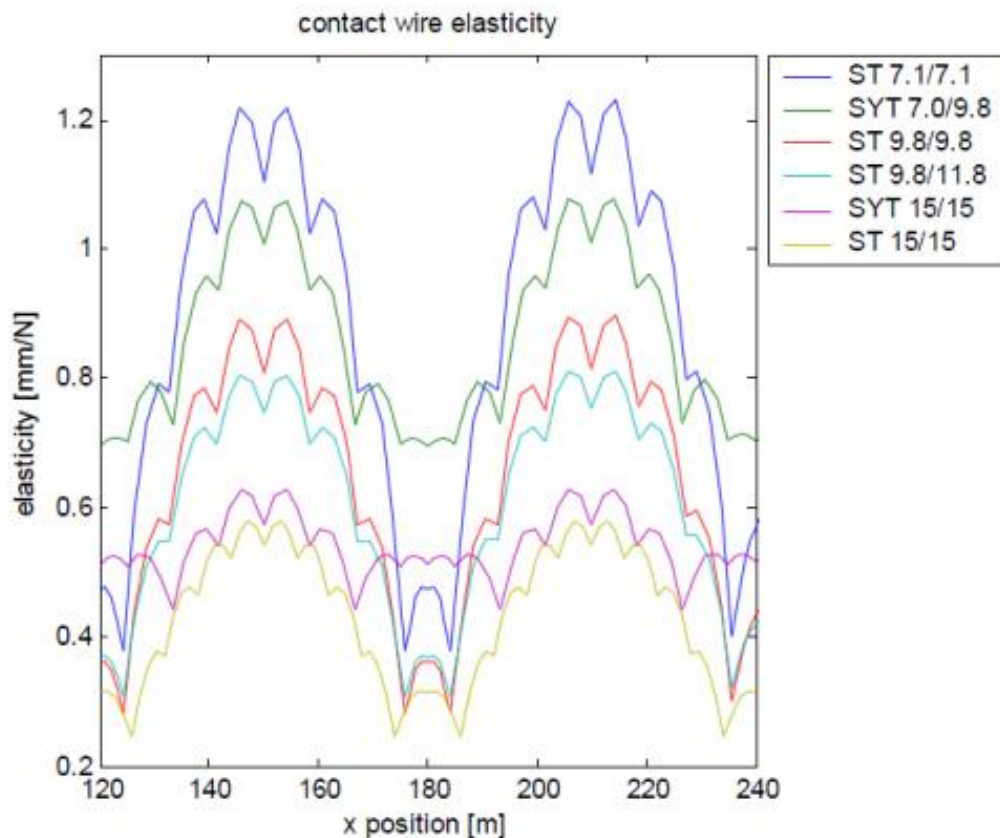
4.1 Elasticitet

Elasticitet kan beskrivas som förmågan ett material har att återgå till sin ursprungliga storlek och form efter att det har utsatts för en deformerande kraft (Heyden et. al 2017). Den kraft som deformerat materialet omvandlas till potentiell energi som sen omvandlas till rörelseenergi som får materialet att återgå till sin viloform.

Fasta material som till exempel en kontaktledningstråd kommer deformas något av strömavtagaren när dess upptryck pressas mot ledningen och när strömavtagaren har passerat förbi kommer kontaktledningen återgå till sin ursprungliga form.

För ett höghastighetssystem eftersträvas en något ökad elasticitet vid utliggare som gör att strömavtagaren får lättare att lyfta upp kontakttråden från den styva upphängningen (Järnvägsskolan 2011b). Det optimala höghastighetssystemet har låg variation av elasticitet mellan utliggare och spannmitt vilket ger strömavtagaren en jämn gång över hela spannet. Elasticiteten e är som högst i spannmitt för en kontaktledning på grund av att spannmitten är längst från de styva upphängningspunkterna och påverkas således inte lika mycket av fasthållningen och har lättare att svänga fritt. Längre spannlängd ger högre elasticitet i ledningen medan ökad inspänningskraft ger lägre elasticitet i ledningen.

Det största värdet för elasticiteten i ett system betecknas e_{max} och det lägsta värdet betecknas e_{min} . Dessa värden tas fram med hjälp av simuleringar för systemet. Från en simulering, se Figur 14, kan elasticitetsvariationen utläses för hela spannet.



Figur 14: Vertikal elasticitetsvariation för sex olika svenska kontaktledningssystem (Banverket 2006).

Med högsta och lägsta värdet för elasticiteten går det att få fram en elasticitetsfaktor på hur bra ett system är på att hålla elasticiteten jämn över hela spannet (Banverket 2006).

Detta görs med följande formel:

$$u = 100 \cdot \frac{(e_{max} - e_{min})}{(e_{max} + e_{min})} \quad (1)$$

där u = elasticitetsfaktorn i procentenhet
 e_{max} = största värdet för elasticiteten för kontaktledning [mm/N]
 e_{min} = lägsta värdet för elasticiteten för kontaktledning [mm/N]

Kontaktledningssystemet tillåter generellt högre hastigheter desto lägre värdet på u är. Lågt värde betyder att variationen på elasticiteten i systemet är liten vilket eftersträvas. Enligt standarden UIC 799 OR (Union Internationale des Chemins de fer se ADIF 2021) bör elasticitetsfaktorn vara mindre än 10% för system med STH högre än 300 km/h.

4.2 Vågutbredningshastighet

Vågutbredningshastigheten v är den hastighet som en våg transporterar energi utan att förflytta massa (Kießling et. al 2001). Energin som strömavtagaren tillför kontakttråden kan orsaka att kontakttråden slits sönder om den tillförande energin inte leds bort.

Vågutbredningshastigheten kan beräknas på följande sätt:

$$v = \sqrt{\frac{F_a}{m_k}} \quad (2)$$

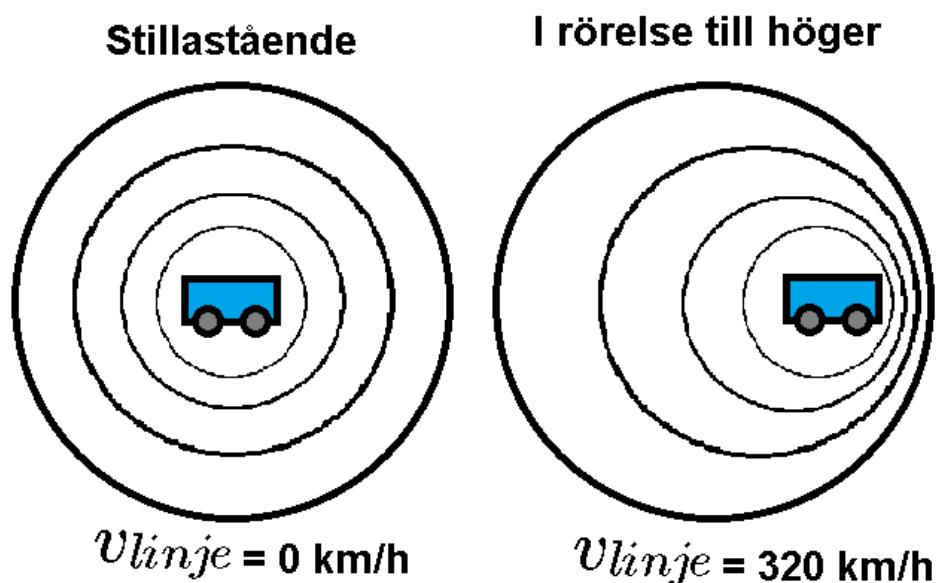
där v = vågutbredningshastighet [m/s]
 F_a = inspänningskraft för kontakttråd [N]
 m_k = totala massan per meter för kontakttråden [kg/m]

Ett kontakttrådsmaterial med hög draghållfasthet tillåter högre inspänningskraft vilket ger en högre vågutbredningshastighet (Kießling et. al 2001). En kontakttråd med stor tvärsnittsarea ger bättre ledningsförmåga och högre draghållfasthet men blir också tyngre per meter vilket påverkar vågutbredningshastigheten. Det gäller vid framtagande av ett system att hitta en bra balans mellan dessa kriterier.

4.3 Dopplereffekt

Dopplereffekten kan beskrivas som förmågan att en frekvens hos en våg förändras när källan till vågen sätts i rörelse i jämförelse mot den som tar emot vågen, se Figur 15. Ett liknande fenomen bildas i kontaktledningen när strömavtagarens upptryck får kontakttråden att börja svänga och skapar en våg i kontakttråden (Kießling et. al 2001). Vågen rör sig med vågutbredningshastigheten som kan blockas och reflekteras tillbaka mot strömavtagaren när den möter en tung punkt som till exempel en bärtråd eller upphängningspunkt. Vilken svängningsfrekvens den reflekterade vågen har när den kommer tillbaka beror på strömavtagarens hastighet och vågens hastighet på grund av dopplereffekten.

Reflektionsvågorna som bildas gör arbetsförhållandet mellan strömavtagaren och kontaktråden mer komplicerat och kan öka eller minska svängningsgrad på kontaktråden eftersom vågen tvingar strömavtagaren att röra sig med vågrörelsen i vertikalled (Kießling et. al 2001). För att korrekt uttrycka arbetsprestandan mellan strömavtagare och kontaktledning krävs det att fler faktorer tas i beaktning, men den grundläggande principen för förhållandet kan uttryckas på detta sätt.



Figur 15: Illustration för dopplereffekten. (Appelholm, 2021)

4.4 Dopplerfaktor

Dopplerfaktorn α är en faktor som beskriver dopplereffekten på förhållandet mellan strömavtagarens hastighet och vågutbredningshastigheten i kontaktledningen (Kießling et. al 2001). Värdet på dopplerfaktorn går mot noll när tåghastigheten ökar mot vågutbredningshastigheten.

Dopplerfaktorn kan beräknas på följande sätt:

$$\alpha = \frac{v - v_{linje}}{v + v_{linje}} \quad (3)$$

där α = dopplerfaktor
 v = vågutbredningshastighet [m/s]
 v_{linje} = tänkt hastighet på sträckan [m/s]

Om strömavtagarens hastighet och vågutbredningshastigheten är lika blir värdet på dopplerfaktorn noll, vilket innebär att kraften vid strömavtagaren blir oändligt stor (Kießling et. al 2001). Detta ska undvikas då det kan göra att kontaktledningen eller strömavtagaren går sönder. På grund av detta är den tänkta tåghastigheten för en sträcka alltid lägre än vågutbredningshastigheten.

Enligt standarden UIC 799 OR (Union Internationale des Chemins de fer se ADIF 2021) bör dopplerfaktorn vara större än 0,17 för en sträcka med STH 350 km/h.

4.5 Reflektionsfaktor

Reflektionsfaktorn r är kvoten mellan höjden av den reflekterade vågen och den ursprungliga vågen (Kießling et. al 2001). När den ursprungliga vågen träffar bärtråden kommer en del reflekteras tillbaka mot strömavtagaren medan en del kommer fortsätta framåt samt en del fortsätter upp i bärtråden. Reflektionsfaktorn beskriver förhållandet mellan den ursprungliga vågen och hur stor del av den som reflekteras tillbaka mot strömavtagaren.

Reflektionsfaktorn kan beräknas på följande sätt:

$$r = \frac{\sqrt{F_b \cdot m_b}}{\sqrt{F_b \cdot m_b} + \sqrt{F_a \cdot m_k}} \quad (4)$$

där

- r = reflektionsfaktor
- F_a = inspänningskraft för kontakttråd [N]
- F_b = inspänningskraft för bärlina [N]
- m_b = totala massan per meter för bärlina [kg/m]
- m_k = totala massan per meter för kontakttråden [kg/m]

Ett kontaktledningssystem är bättre på att ta upp och dämpa ner reflektioner, vid bärtrådar och utliggare, desto lägre värde på r är för systemet (Kießling et. al 2001). Faktorn r kan således användas som en parameter på hur bra design ett kontaktledningssystem har.

Enligt standarden UIC 799 OR (Union Internationale des Chemins de fer se ADIF 2021) bör reflektionsfaktorn vara mindre än 0,4 för STH över 300 km/h

4.6 Förstärkningsfaktor

Förstärkningsfaktorn x beskriver effekten för hur strömavtagaren påverkar den våg i kontaktledningen som reflekteras tillbaka mot strömavtagaren igen av systemet (Kießling et. al 2001). Strömavtagarens rörelse påverkar den reflekterande vågen när den reflekteras tillbaka till strömavtagaren igen beroende på strömavtagarens hastighet. Fenomenet med vågrörelserna pågår hela tiden när strömavtagaren framförs mot kontaktledningen och studsar fram och tillbaka till dess att en tung punkt, så som en utliggare, har passerats eller strömavtagaren går in på en ny sektion.

$$x = \frac{r}{\alpha} \quad (5)$$

där x = förstärkningsfaktorn
 r = reflektionsfaktor
 α = dopplerfaktorn

Om förstärkningsfaktor är mindre än 1 kommer strömavtagaren inte förstärka energin i vågen varje gång den studsar fram och tillbaka (Kießling et. al 2001). Är faktorn däremot större än 1 kommer strömavtagaren förstärka energin i vågen för varje reflektion som studsar fram och tillbaka. Eftersom faktorn x beror på dopplerfaktorn α och reflektionsfaktorn r är den en funktion av tåghastigheten.

Enligt standarden UIC 799 OR (Union Internationale des Chemins de fer se ADIF 2021) bör förstärkningsfaktorn vara mindre än 2,3 för STH över 300 km/h.

4.7 Vindhastighet och vindavdrift

Vindavdrift är ett mått på hur mycket kontaktledningen avviker i sidled på grund av sidvind gentemot dess tänkta läge över spårmit. Vindavdriften beräknas på olika sätt runt om i Europa. I TSD Energi (EU 2208/284/EG) finns krav att under påverkan av vind får kontaktrådets maximalt avvika i sidled enligt Tabell 3, oberoende av kontaktledningshöjd och radie på sträckan.

Strömavtagarens bredd (mm)	Maximal avvikelse i sidled (mm)
1600	400
1950	550

Tabell 3: Maximal tillåtna avvikelse i sidled av kontaktråden i förhållande till spårmit som påverkas av vind. (EU 2208/284/EG)

I Sverige används strömavtagare, se Figur 16, med bredden 1800 eller 1950 mm. Enligt TRVINFRA-00144 (Trafikverket 2020b) är kravet att systemet måste klara av en vindavdrift som är mindre än 500 mm för dagens strömavtagare. I de flesta andra länder i Europa används europastandardströmavtagare som har bredden 1600 mm vilket betyder att systemet måste klara av en vindavdrift som är mindre än 400 mm. Idag bygger Sverige kontaktledning för att passa samtliga tre (1600, 1800 och 1950 mm) strömavtagare



Figur 16: Exempel på strömavtagare. (Banverket 2006)

Kontaktledningens vindavdrift är direkt kopplat till vindhastigheten som blir en viktig parameter när krav ställs på systemet. Systemet måste klara kraven för att inte riskera att strömavtagaren hamnar utanför kontaktledningen när vinden påverkar kontaktledningen.

För att räkna ut den maximalt tillåtna vindavdriften i ett system används olika standarder i Europa och i Sverige. När Tyskland utvecklade systemet RE250, på vilket det svenska systemet SYT 15/15 bygger, ställde standarden DIN EN 50 341-3-4 (Kießling et. al 2001) kravet att de ska klara av en vindhastighet på 33 m/s när kontaktledningen monteras upp till 100 meter över marken och 37,1 m/s på höjder över 100 meter över marken. I många länder som exempelvis Tyskland och Frankrike används zonindelningar med olika krav beroende på dess olika vindförhållanden.

I Sverige används dock vindhastigheten 28,8 m/s i hela landet (Svensson 2014).

5 Systembeskrivningar

I detta kapitel ges detaljerade beskrivningar av de olika systemen som används i studien samt en sammanställning av grundläggande kravbild för kontaktledningssystem. Samtliga data kommer ifrån de olika systemens systembeskrivningsdokument.

5.1 Kravbild

De olika systemen som studien jämför är uppbyggda på samma sätt med utliggare, Y-linor och stolpar så som beskrivs grundläggande i kapitel 3. Det som i huvudsak skiljer systemen åt är linornas inspänningskrafter och area (Trafikverket 2020c). Sveriges SYT 21/27 är en vidareutveckling på det befintliga SYT 15/15 men med en annan konstruktion av utliggare, viktavspänningar samt linarea.

Samtliga system i studien är utvecklade för att efterfölja EU:s förordning TSD Energi (EU 2008/284/EG). Det svenska SYT 15/15-systemet uppfyller kraven trots att systemet utvecklades innan regelverket från EU var på plats.

Elasticiteten i kontaktledningssystemen varierar beroende på de olika systemens uppbyggnad (Kießling et. al 2001). De huvudsakliga faktorerna som avgör ett systems elasticitet, och därmed komabiliteten för höghastighet är:

- Antalet kontakt- och bärlinor
- Kontakt- och bärlinornas massa
- Linornas inspänningskrafter
- Spannlängden
- Y-linornas längd och inspänningskraft
- Utliggarens uppbyggnad
- Typ, antal och position av bärtrådar

Vågutbredningshastigheten skall, enligt europaförordning 2008/284 (EU 2008/284/EG), anpassas så att banans hastighet inte överskrider 70% av vågutbredningshastigheten.

Enligt standarden EN 50119 (SIS 2012) ska beställaren ställa krav på vilket temperaturspann systemet ska klara av som de specificerar till tillverkaren utefter standarden EN 50149. Den satta temperaturen i systembeskrivningen betyder således att systemet klarar temperaturskillnaden utan att ta skada eller förändra dess funktion.

I kontaktledningssystemen eftersträvas att alla komponenter har lång livslängd med hög mekanisk och elektrisk tålighet, är stryktåliga för vädermässiga förändringar samt att de har en hög driftsäkerhet (Kießling et. al 2001). Systemets beståndsdelar ska vara av ett material som är rostfritt och som inte bryts ner av korrosion. I ett bra system eftersträvas också en så jämn elasticitet som möjligt för att inte slita ner kontakttråden.

Den elektriska överföringen till tåget skall installeras för att behålla en säker och oavbruten överföring även under lokala förhållanden (Siemens 2005).

5.2 SYT 15/15

Trafikverkets system SYT 15/15 är det system som idag tillåter högst hastighet i det svenska järnvägsnätet med 250 km/h. Systemet togs fram och började byggas i Sverige under början av 1990-talet. Systemet används idag på cirka 15 sträckor i Sverige om cirka 220 mil, exempelvis Mäljarbanan mellan Stockholm och Västerås (Trafikverket 2014).

Systemet är framtaget med följande krav:

- Systemets maximala hastighet är 250 km/h för två strömavtagare med ett avstånd om minst 200 meter ifrån varandra.
- Bärhinans inspänningskraft är 15 kN.
- Kontakttrådens inspänningskraft är 15 kN.
- Y-linorna i systemet ska vara 18,5 meter och vara inspända med 2,8 kN.
- Systemets sektionlängd får inte överskrida 1200 meter.
- Maximalt stolpavstånd är 65 meter.
- Nominell kontaktledningshöjd är 5500 mm över RÖK.
- Nominell systemhöjd för utliggare är 1550 mm.
- Systemet ska projekteras och byggas för strömavtagarbredderna 1600 mm, 1800 mm och 1950 mm.
- Sektionsövergång ska ske över fem spann.
- Minsta tillåtna kurvradie är 1200 meter.

Systemet är byggt för att kunna trafikeras i vindstyrkor på upp till 29 m/s. Systemet klarar temperaturer på mellan -40°C och +100°C.

5.3 SYT 21/27

I samband med Sveriges planerade höghastighetsbanor har Trafikverket valt att utveckla SYT 15/15-systemet till ett nytt SYT 21/27-system. Systemet är framtaget av Trafikverkets elkraftsgrupp med hjälp av konsultfirmor som projekterar kontaktledningssystem. Systemet är framtaget med inspiration från internationella system som redan är utvecklade för just höghastighetsbanor. Systemet är tänkt att användas vid byggnation av nya höghastighetsbanor i Sverige.

Systemet är framtaget med följande krav:

- Systemets maximala hastighet är 320 km/h för två strömvtagare med ett avstånd om minst 200 meter ifrån varandra.
- Bärlinans inspänningskraft är 21 kN.
- Kontaktrådets inspänningskraft är 27 kN.
- Y-linorna i systemet ska vara 18,5 meter och vara inspända med 3,5 kN.
- Systemets sektionslängd får inte överskrida 1430 meter.
- Maximalt stolpavstånd är 65 meter.
- Nominell kontaktledningshöjd är 5300 mm över RÖK.
- Nominell systemhöjd för utliggare är 1550 mm.
- Systemet ska projekteras och byggas för strömvtagarbredderna 1600 mm, 1800 mm och 1950 mm.
- Sektionsövergång ska ske över fem spann.
- Minsta tillåtna kurvradie är 3500 meter.

Systemet är byggt för att kunna trafikeras i vindstyrkor på upp till 26 m/s. Systemet klarar temperaturer på mellan -40°C och +100°C.

5.4 Siemens SICAT HA

Siemens är en stor aktör inom kontaktledning internationellt och har utvecklat flera system för höghastighetsbanor. Det mest avancerade höghastighetssystemet går under namnet SICAT HA och är utvecklat för hastigheter upp till 350 km/h. Systemet finns i två olika utföranden, SICAT HA samt SICAT HA 2.0. HA och HA 2.0 är uppbyggda på samma sätt men har olika inspänningskrafter och använder olika dimensioner på linor. Systemet använder sig av komponenter i aluminium. Systemet används över hela världen och återfinns bland annat i Kina, Tyskland och Spanien.

Systemet är framtaget med följande krav:

- Systemets maximala hastighet är 350 km/h för en strömavtagare och 330 km/h för två strömavtagare med ett avstånd om minst 200 meter ifrån varandra.
- Bärlinans inspänningskraft är 21 kN (HA) eller 25 kN (HA 2.0).
- Kontakttrådens inspänningskraft är 27 kN (HA) eller 23 kN (HA 2.0).
- Y-linorna i systemet ska vara 22 meter och vara inspända med 3,5 kN.
- Systemets sektionslängd får inte överskrida 1400 m (HA) eller 2000 m (HA 2.0).
- Maximalt stolpavstånd är 75 meter.
- Nominell kontaktledningshöjd är 5300 mm över RÖK.
- Nominell systemhöjd för utliggare är 1200 mm till 1600 mm.
- Systemet ska projekteras och byggas för strömavtagarbredderna 1600 mm, 1800 mm och 1950 mm.
- Sektionsövergång ska ske över fem spann (HA) eller tre spann (HA 2.0).
- Minsta tillåtna kurvradie är 3000 meter.

Systemet är byggt för att kunna trafikeras i vindstyrkor på upp till 33 m/s. Systemet klarar temperaturer på mellan -30°C och +80°C.

5.5 RPS TracFeed ALU 3000

Rail Power Systems är en tysk utvecklare av kontaktledningssystem och deras TracFeed ALU 3000-system är företagets höghastighetssystem. Systemet bygger, likt Siemens system, på komponenter i aluminium. Systemet är framtaget för att klara hastigheter upp till 400 km/h. Systemet används över hela världen och återfinns bland annat i Turkiet, Kina, Norge och Tyskland.

Systemet är framtaget med följande krav:

- Systemets maximala hastighet är 400 km/h för två strömavtagare med ett avstånd om minst 200 meter ifrån varandra.
- Bärinans inspänningskraft är 21 kN.
- Kontakttrådens inspänningskraft är 27 kN.
- Y-linorna i systemet ska vara 18 meter och vara inspända med 3,5 kN.
- Systemets sektionslängd får inte överskrida 1252 meter.
- Maximalt stolpavstånd är 65 meter.
- Nominell kontaktledningshöjd är 5300 mm över RÖK.
- Nominell systemhöjd för utliggare är 1800 mm.
- Systemet ska projekteras och byggas för strömavtagarbredderna 1600 mm, 1800 mm och 1950 mm.
- Sektionsövergång ska ske över fem spann.
- Minsta tillåtna kurvradie är 3000 meter.

Systemet är byggt för att kunna trafikeras i vindstyrkor på upp till 33 m/s. Systemet klarar temperaturer på mellan -30°C och +80°C.

5.6 Adif C-350

Det spanska Adif C-350-systemet är det kontaktledningssystem som används på de spanska höghastighetsbanorna. Systemet är utvecklat mellan det franska företaget Alstom tillsammans med det spanska företaget SEMI och förvaltas av Adif, Spaniens motsvarighet till Trafikverket. Systemet används idag i Spanien och i Saudiarabien.

Systemet är framtaget med följande krav:

- Systemets maximala hastighet är 350 km/h.
- Bärlinans inspänningskraft är 15,75 kN.
- Kontakttrådens inspänningskraft är 31,5 kN.
- Y-linorna i systemet ska vara 18 meter och vara inspända med 3,5 kN.
- Systemets sektionslängd får inte överskrida 1400 meter.
- Maximalt stolpavstånd är 64 meter.
- Nominell kontaktledningshöjd är 5300 mm över RÖK.
- Nominell systemhöjd för utliggare är 1400 mm.
- Systemet ska projekteras och byggas för strömavtagarbredden 1600 mm.
- Sektionsövergång ska ske över fyra spann när spannlängden överskrider 55 meter, i annat fall fem spann.
- Minsta tillåtna kurvradie är 7500 meter.

Systemet är byggt för att kunna trafikeras i vindstyrkor på upp till 33 m/s. Systemet klarar temperaturer på mellan -30°C och +80°C.

6 Analys av systemen

Tillverkarna använder sig av kopparlegering på grund av dess goda ledningsförmåga samt dess höga hållfasthet. De övriga komponenterna i hängverket är oftast av aluminium i europeiska system. Sverige använder sig dock av stål till utliggare istället för aluminium, vilket kan bero på att Sverige har mycket ståltillverkning och kan således få ner kostnaden för materialet.

Vilken linarea systemet använder beror på vilken hastighet systemet är tänkt att klara av. Det krävs större linarea vid högre hastigheter eftersom tåget förbrukar mer energi samt vid högre hastigheter blir upptrycket från strömvagnen större och för att kompensera detta behöver kontaktledningen högre inspänningskraft. För att klara den högre inspänningskraften kan det därför krävas grövre lina.

Inspänningskraften bestäms i samband med vilken linarea och hastighet systemet byggs för. Dras det för hårt i en ledning kommer den med tiden slitas ner snabbare och kan till sist gå av. Det är därför viktigt att hitta en linarea som klarar den tänkta inspänningen och som klarar av de parametrar som bestämmer hastigheten för sträckan. Problemet är att inspänningskraften är direkt kopplad till vågutbredningshastigheten och elasticiteten i systemet. Det innebär att tillverkaren måste hitta ett kontaktledningsmaterial som har låg vikt per meter och som klarar höga krafter utan att brista.

Ökad inspänningskraft ger däremot ökad last på stolpar och utliggare som kan kräva en annan utformning för att ledningen ska bibehålla dess rätta höjd- och sidoläge. Det betyder i sin tur att komponenterna i systemen kan få en kortare livslängd om de är framtagna för ett visst drag och tillverkaren succesivt skulle öka draget i linorna utan att ändra utformningen på resterande komponenter.

Vid framtagandet av ett system är målhastigheten en av de första parametrarna som fastställs. Det betyder att systemet måste anpassas utefter det ställda hastighetskravet. Det innebär således att material, linarea samt inspänningskrafter bestäms i förhållande till vilken hastighet som systemet ska byggas för. I framtagandet är också underhåll och livslängd på komponenter viktigt att tänka på, därför kan två system med exakt samma material, linarea och inspänningskrafter byggas för olika hastigheter och därmed få olika livslängder.

I Tabell 4 påvisas detta för det planerade SYT 21/27 som använder sig av samma material, area på linor samt samma inspänningskrafter som ALU 3000. Trots detta har systemet en maximal hastighet på 80 km/h lägre än ALU 3000. Detta beror till största sannolikhet på att det svenska systemet väljer att ha större säkerhetsmarginal och därmed slita mindre på utrustningen genom att sänka hastigheten, däremot är det inget som säger att själva kontaktledningssystemet inte klarar av att framföra ett tåg i 400 km/h.

I samma tabell kan det även avläsas att SICAT HA 2.0-systemet använder sig av lägre dimensioner på linor och samtidigt tolererar en högre hastighet än SYT 21/27. Detta beror på att den tunnare linan klarar av tillräckligt hög inspänningskraft för att kompensera för upptrycket från strömavtagaren samt att kontakttrådens vikt är lägre vilket gör att vågutredningshastigheten blir högre än för övriga system. De tunnare ledningarna samt lägre inspänningskrafterna är snällare på övriga komponenter än i övriga system, vilket i sin tur kan leda till mindre underhållsbehov samt längre livslängd på komponenter. Den tunnare ledningen skulle dock kunna slitas ner snabbare än i andra system.

System-beteckning	Bärlina		Kontakttråd		Hastighet i km/h
	Material	Inspänningskraft	Material	Inspänningskraft	
SYT 15/15	70 mm ² Bz	15 kN	120 mm ² CuAg	15 kN	250
SYT 21/27	120 mm ² BzII	21 kN	120 mm ² CuMg0.5	27 kN	320
Siemens SICAT HA	120 mm ² BzII	21 kN	120 mm ² CuMg0.5	27 kN	350
Siemens SICAT HA 2.0	95 mm ² BzII	25 kN	100 mm ² CuMg0.5	23 kN	350
RPS ALU 3000	120 mm ² BzII	21 kN	120 mm ² CuMg0.5	27 kN	400
Adif C-350	95 mm ² Cu	15.75 kN	150 mm ² CuMg0.5	31.5 kN	350

Tabell 4: Ledningsfakta för de olika kontaktledningssystemen.

C-350 är det system i Tabell 4 som sticker ut mest av systemen med dess tunnare linarea med lägre inspänningskraft på bärlina, samt grövre linarea med högre inspänningskraft på kontakttråden än övriga system som klarar en hastighet över 300 km/h. Detta kan bero på att det spanska systemet vid framtagandet har utvecklats med hjälp av en fransk aktör som brukar använda dessa inspänningskrafter. Likt svenskarna som tittat på hur tyskarna bygger sina system har spanjorerna kanske fått inspiration att bygga som fransmännen.

SYT 15/15 är det system som hamnar efter när författarna jämför maxhastigheten, eftersom systemet var framtaget med just målhastigheten 250 km/h på tidigt 90-tal. Till skillnad från de andra systemen i jämförelsestudien har SYT 15/15 en kontakttråd av kopparsilver som enligt Tabell 1 kap 3.7, har bättre ledningsförmåga men lägre hållfasthet. Även vid användning av 120 mm² lina gör den lägre hållfastheten att systemet inte klarar av samma inspänningskrafter som övriga system. Teoretiskt sätt skulle systemet klara av högre inspänningskraft vilket skulle leda till något högre maxhastighet men när systemet togs fram i början på 90-talet hade Sverige inga tåg som klarade av att framföras med en hastighet på över 250 km/h. Även idag år 2021 är det få av de vanligaste tågen som trafikerar svensk järnväg som klarar av att köra dessa hastigheter, dessutom är det mindre troligt att övriga bantekniska komponenter skulle klara av höga hastigheter än de som används idag. Den satta temperaturskillnaden är till för att driftsäkra systemen och göra de användbara även vid hårdare klimat. Beroende på i vilket land och vilken breddgrad systemet ska verka ställs då olika krav. I norra Europa är generellt klimatet något kallare än i södra Europa vilket gör att systemen måste anpassas och byggas av material som tolererar större temperaturskillnader.

Vilken vindhastighet ett system klarar av beror på dess spannlängd samt inspänningskraften i ledningarna. Maximal vindhastighet för ett system finns där som en säkerhetsmarginal för att inte kontakttråden ska svänga iväg utanför strömavtagarens bredd i spannmitt, där ledningen är som mest känslig för vind. Inför planering av byggnation är det viktigt att undersöka sträckan för vilka vindhastigheter som kan uppnås i extrema förhållanden. Exempelvis om systemet ska verka i en vindkänslig miljö skulle en minskning av spannlängden kunna göras för att säkra upp systemet.

Varför det nya systemet SYT 21/27 har lägre tolerans för maximal vindhastighet framgår inte från Trafikverkets sida. Värdet kan bero på en mängd olika parametrar, möjligen kan det vara att man väljer i SYT 21/27 att inte använda sig av vindsäkringar i utliggare som gör att man minskar toleransen. Dock stängs tågtrafik av även vid mindre vindhastigheter än 26 m/s. Det är Trafikverket som beslutar när trafiken ska stängas av och kan ha med exempelvis en sträckas trädsäkring längs banan snarare än kontaktledningens begränsningar. Varför de svenska systemen överlag klarar lägre vindhastighet är dock oklart då Sverige följer EU-krav på vindavdrift precis som övriga aktörer.

Förutom vid vindkänsliga ställen och i kurvor bestäms den maximala spannlängden för ett system på dess förmåga att hålla kontakttråden i rätt höjd- och sidoläge, samt på dess förmåga att bevara en jämn elasticitet längs hela spannlängden i kontakttråden både på spannmitt och vid utliggare. Vid framtagandet av ett system är det därför viktigt att dessa kriterier ligger innanför kraven. Däremot är det viktigt att göra spannlängden så lång som möjligt för att spara in på kostnaden eftersom kortare spannlängd betyder högre materialanvändning.

Vilken sektionslängd ett system klarar av beror på kontaktledningens längdutvidgning som i sin tur beror på temperaturskillnader. Vikterna som hängs upp på vardera sida om en sektion fungerar som inspänningen för linan samt för att kompensera mot temperaturförändringar som gör att linan drar ihop sig eller blir längre. Eftersom kontaktledningshöjden för höghastighetsbana normalt ligger på 5,3 meter betyder det att vikterna har en begränsad längd att vandra på. Det är önskvärt att göra sektionerna så långa som möjligt för att spara in på material.

I Tabell 5 är det de två svenska systemen som sticker ut vad gäller vindhastighet och temperatur. Att de svenska systemen klarar -10°C lägre temperaturer än övriga beror mest troligen på att Sverige har något kallare klimat och därmed ställer högre krav på kontaktledningen.

Vad gäller isbildning på kontaktledningen kan man tänka att om det blir en isbildning på 0,5 kg per meter och lägger till detta i uträkning i SYT 21/27 så går vågutbredningshastigheten i systemet från 572 km/h till 472 km/h. Med säkerhetsmarginalen om 70% ger detta en hastighet på 330,5 km/h vilket innebär att systemet fortfarande kan trafikeras på utsatta 320 km/h även med 0,5 kg/m is på ledningen. 0,5 kg/m får anses vara ungefär medelklassificering av isbildning på kontaktledning. Det är dock troligare att problematik uppkommer med strömvtagarens kontakt med körtråden vilket kan dra ner hastigheten.

System-beteckning	Maximal spannlängd [m]	Maximal sektionlängd [m]	Temperatur [°C]	Vindhastighet [m/s]
SYT 15/15	65	1200	-40 till +100	29
SYT 21/27	65	1430	-40 till +100	26
Siemens SICAT HA	70	1400	-30 till +80	33
Siemens SICAT HA 2.0	75	2000	-30 till +80	33
RPS ALU 3000	65	1252	-30 till +80	33
Adif C-350	64	1400	-30 till +80	33

Tabell 5: Kriterier som ställs på de olika kontaktledningssystemen

Vidare i Tabell 5 är det SICAT HA och HA 2.0 som klarar av längre spannlängd samt sektionlängd än övriga system. Dessa parametrar har mest troligen tagits fram från simuleringar på deras system som visar en så pass jämn elasticitet i systemet att den ökade spannlängden inte ställer till det. De har längre y-linor vilket möjligt ger en jämnare elasticitet över hela spannet.

Att SICAT HA 2.0 kan ha mycket längre sektionlängd kan även bero på att de använder sig av en lägre utväxling på viktavspänningen än övriga system, vilket gör att de kan hålla tråden spänd även om de förlänger den. HA 2.0 har också en kortare sektionspunkt om tre spann istället för fem som förlänger sektionlängden ytterligare.

7 Resultat av egna beräkningar

I detta avsnitt redovisas resultatet av utförda beräkningar samt metodik för beräkningarna som författarna ansåg vara relevanta för jämförelsestudien. Kapitlet avslutas med en analys av utförda beräkningar.

7.1 Elasticitetsfaktor och vågutbredningshastighet

För att få fram en elasticitetsfaktor har författarna fått ta del av elasticitetssimuleringar från två aktörer. Från dessa fås det högsta och lägsta värdet på elasticiteten. Från Trafikverket erhöles även ett diagram med värden för befintliga system, se Figur 14. Med dessa värden kan enligt formel 1 elasticitetsfaktorn beräknas. Elasticitetsvärden för Siemens SICAT HA och RPS ALU 3000 har författarna inte tilldelats och kan därmed inte göra beräkningar på systemen, däremot fanns ett ungefärligt värde för SICAT i tilldelad systembeskrivning som presenteras med uträknade elasticitetsfaktorer i Tabell 6.

För att räkna ut vågutbredningshastigheten för de olika systemen används indata för kabelvikt från Tabell 1 samt indata för inspänningskraft från Tabell 4 för att sedan använda formel 2 för att räkna ut vågutbredningshastigheten. De olika systemens vågutbredningshastighet redovisas i Tabell 6. Av RPS tillhandahållen systembeskrivning har författarna fått en betydligt högre vikt per meter på kontakttråden mot vad övriga aktörer samt leverantören av kablage, Elcowire, presenterar. Därav den lägre vågutbredningshastigheten gentemot övriga system.

System-beteckning	Elasticitetsfaktor u [%]	Vågutbredningshastighet [km/h]	70 % av vågutbredningshastighet [km/h]
SYT 15/15	16,67	426	298
SYT 21/27	14,67	572	400
Siemens SICAT HA	10-20	572	400
Siemens SICAT HA 2.0	10-20	579	405
RPS ALU 3000	i.u	516	361
Adif C-350	5,58	545	382

Tabell 6: Elasticitetsfaktor över spannet samt vågutbredningshastigheter för de olika kontaktledningssystemen.

Elasticitetsskillnaden i systemet blir viktigare när hastigheten ökar eftersom strömvtagaren har en tendens att börja studsas om elasticiteten skiljer sig för mycket mellan spannmitt och utliggare. För att uppnå jämn elasticitet vid ökad inspänningskraft hängs kontakttråden oftast upp med y-lina, som gör att elasticiteten vid utliggaren blir högre för att kompensera med den högre elasticiteten som är i spannmitt. Ett andra alternativ för att få en jämn elasticitet är att korta ner spannlängden. Dock vill detta undvikas av kostnadsskäl.

Från Tabell 6 kan det utläsas att C-350 har lyckats bäst med att hålla en jämn elasticitet. Detta tror författarna kan bero på den höga inspänningskraften i linan vilket gör kontakttråden styvare i spannmitt och på grund av detta även håller sig inom referensvärdet för elasticitet som UIC rekommenderar. De övriga systemen, utom ALU 3000, ligger strax över referensvärdet men samtidigt på en rimlig nivå. Att de ligger lite över tror författarna beror på att de har lägre inspänningskraft samt tunnare lina som gör den mer flexibel i spannmitt gentemot C-350:s grövre, styvare lina. Det är trots allt bara en satt rekommendation och inget krav.

Dessa värden simuleras fram och hade de varit helt orimliga skulle systemen inte varit framtaget på detta sätt och även inte vara tillåtna att använda i Europa.

I kontaktledningssystem eftersträvas en så hög vågutbredningshastighet som möjligt. Det betyder att tillverkaren önskar ett kontaktledningsmaterial som har låg vikt per meter och som klarar av hög inspänningskraft.

Gällande vågutbredningshastigheten i Tabell 6 klarar teoretiskt SYT 15/15 som mest 426 km/h. Detta beror på dess låga inspänningskraft gentemot de övriga systemen. Som säkerhetsmarginal används att ett tåg får som högst framföras i 70% av vågutbredningshastigheten som innebär att SYT 15/15 teoretiskt skulle kunna klara tåghastigheter av 298 km/h. Ibland är grövre lina och högre inspänningskraft inte svaret för att uppnå högre hastigheter. C-350 är det perfekta exemplet på detta som trots att det använder sig av grövre linarea samt högre inspänningskraft bara klarar en teoretisk tåghastighet om 382 km/h. Det ökade tvärsnittet på kontakttråden och den ökade vikten kompenserar inte upp för den ökade inspänningskraften.

Det bäst optimerade systemet avseende dessa parametrar är SICAT HA 2.0, som använder sig av tunnare lina och något lägre inspänningskraft vilket ger en teoretisk tåghastighet om 405 km/h.

Systemet SYT 21/27, SICAT HA och ALU 3000 använder sig av precis samma inspänningskraft och liknande kontaktledningstråd, däremot skiljer sig ALU 3000 från de andra två. Detta beror på att i tillhandahållen systembeskrivning väger deras kontakttråd mer. Den ökade vikten drar ner den teoretiska tåghastigheten till 361 km/h vilket betyder att deras system inte klarar av 400 km/h med en säkerhetsmarginal om 70%. Tillverkaren har dock specificerat i sina dokument att systemet ska klara av 400 km/h gällande vågutbredningshastighet med säkerhetsmarginal om 70% vilket författarnas uträkningar visar att systemet inte gör. Detta tror författarna är ett skrivfel i tillverkarens systembeskrivning vad gäller vikten på linan. Övriga system klarar sig på dess satta hastighet.

7.2 Dopplerfaktor, reflektionsfaktor samt förstärkningsfaktor

För att beräkna dopplerfaktorn för de i studien jämförda system används indata för vågutbredningshastigheten från Tabell 6 samt indata för den tänkta hastigheten systemet är byggt för från Tabell 4. Med dessa värden kan dopplerfaktorn beräknas med hjälp av formel 3. De olika systemens dopplerfaktor redovisas i Tabell 7.

För att beräkna reflektionsfaktorn för de i studien jämförda system används insamlade data för massan på de olika ledningarna från Tabell 1 och Tabell 2 samt indata för inspänningskrafter från Tabell 4. Med dessa värden kan reflektionsfaktorn beräknas med hjälp av formel 4. De olika systemens reflektionsfaktor redovisas i Tabell 7.

För att beräkna förstärkningsfaktorn för de i studien jämförda system används indata för dopplerfaktorn och reflektionsfaktorn från Tabell 7. Med dessa värden kan förstärkningsfaktorn beräknas med hjälp av formel 5. De olika systemens förstärkningsfaktor redovisas i Tabell 7.

Systembeteckning	Dopplerfaktor	Reflektionsfaktor	Förstärkningsfaktor
SYT 15/15	0,26	0,43	1,64
SYT 21/27	0,28	0,47	1,66
Siemens SICAT HA	0,24	0,47	1,94
Siemens SICAT HA 2.0	0,25	0,50	2,05
RPS ALU 3000	0,13	0,44	3,49
Adif C-350	0,22	0,36	1,65

Tabell 7: Beräkningar för olika egenskaper hos systemen.

Dopplerfaktorn ska inte vara för nära noll då det skapar stora krafter i strömvtagaren, vid ökad tåghastighet kommer dopplereffekten bli större. Från Tabell 7 kap 7.2 gällande dopplerfaktorn påvisas att alla system, utom ALU 3000, klarar referensvärdet. Detta beror på att systemen lyckas få en mycket högre vågutbredningshastighet än vad systemets tänkta maxhastighet är. Det låga värdet ALU 3000 får beror på den låga vågutbredningshastighet systemet får på grund av dess tunga lina samt dess satta maxhastighet om 400 km/h detta leder till att systemet inte klarar den satta rekommendationen från UIC.

Reflektionsfaktorn på ett system ska helst vara så låg som möjligt för att undvika att systemet sätts i stora svängningar. Ett väl designat system har mindre reflektioner i kontaktledningen. Vad gällande reflektionsfaktorn påvisas att endast C-350 klarar rekommendationen från UIC på grund av dess högre vikt på lina samt dess högre inspänningskraft som bidrar till mindre reflektionsfaktor gentemot övriga system. Samtliga system ligger likväl på en rimlig nivå och inte långt från rekommendationen.

Förstärkningsfaktorn för ALU 3000 är väldigt stor vilket främst beror på att dopplerfaktorn för systemet är väldigt låg. Systemet ligger en bra bit över rekommendationen från UIC. Av de tre parametrar som studeras här är det förstärkningsfaktorn som är den viktigaste, faktorn bör aldrig ligga över referensvärdet då det kan orsaka förödande konsekvenser. De övriga systemen håller sig inom referensvärdet.

8 Intervjuer

I detta kapitel beskrivs respondenterna kortfattat. De intervjusvar som författarna fått av respondenterna har sammanfattats och presenteras. Kapitlet avslutas med en intervjuanalys. De utförliga frågorna som respondenterna svarat på under intervjuer finns bifogat som bilagor till studien.

8.1 Beskrivning av respondenter

För att underlätta referering samt bevara de intervjuades anonymitet har respondenter med insyn i kommande svenska system tilldelats bokstaven S (för svensk respondent), medan internationella respondenter tilldelats bokstaven I (för internationell respondent).

Respondenternas bakgrund

S1 har arbetat inom järnvägsbranschen sedan 2007 efter att ha doktorerat inom elektroteknik. S1 började sin karriär med arbeten kring samverkan fordon/bana och övergick till elkraft 2010. S1 arbetar idag med utvecklingsprojekt och har en ledande roll vid utvecklingen av det nya SYT 21/27-systemet.

S2 har arbetat inom järnväg i drygt 35 år och har erfarenhet från flertalet större projekt i Sverige, både inom elkraft och andra teknikslag. S2 arbetar idag som sakkunnig och stöttar projektörer med teknisk erfarenhet och har haft ansvar för en del av det nya SYT 21/27-systemet genom sin roll som granskare av konstruktioner.

I1 har arbetat med kontaktledning sedan 2001 och har varit delaktig i flertalet stora internationella projekt bland annat i Kina och USA som projektledare. Idag arbetar I1 med att sälja kontaktledningssystem på den internationella marknaden.

I2 har arbetat med kontaktledning sedan 2010 och är i grunden elektroingenjör. I2 arbetar idag med simuleringar av kontaktledningssystem och är även med i flertalet utvecklingsgrupper som framtar nationella samt internationella standarder inom kontaktledning.

I3 har arbetat med kontaktledning sedan 2012 och är i grunden utbildad mekanikingenjör. I3 arbetar idag som produktchef inom kontaktledning mot den internationella marknaden med ansvar för certifieringar och systemhandlingar.

I4 började jobba inom järnvägen 2005 och har arbetat med underhåll och nybyggnation av kontaktledningar. Blev senare ansvarig för elektrifiering av järnvägsnät som saknat kontaktledning och har senare gått över till att bli teknikchef för elkraft hos en infrastrukturförvaltare. Är i grunden utbildad Elektroingenjör.

I5 arbetar inom public relations och agerar som tolk åt I4. Saknar teknisk bakgrund.

8.2 Intervjusvar

Framtagning av kontaktledningssystem

I3 och I4 menar att de första stegen vid val av kontaktledningssystem är att bestämma mål hastighet för den planerade linjen, något som även S2 är inne på. Detta tillsammans med banmatning och vilken typ av trafik den planerade banan ska ha är grunden i planeringsfasen.

Vad gäller det kommande svenska SYT21/27-systemet menar både S1 och S2 att Trafikverket började utreda scenarion kring att utveckla ett eget system kontra köpa in en komplett lösning. Både S1 och S2 menar att framtagandet av ett eget system löser en del affärsjuridiska problem då Trafikverket som myndighet måste tillämpa offentliga upphandlingar och därmed riskerar att få flertalet olika system på eventuella deletapper vid byggnation av höghastighetsbanor.

Flertalet olika system skulle även vara i negativ bemärkelse med reservdelshållning, trots att många system är av liknande konstruktion menar både S1 och S2. Syftet är att kunna använda sig av de komponenter som används i befintliga system i Sverige även i det nya systemet. Att själva äga konstruktionen ger tillgång till att snabbare få tag på eventuella reservdelar menar S2 då detta gör att förvaltaren kan ta sin egen komponents ritning och få tillverkad om någon komponent skulle saknas.

I5 berättar att man som myndighet måste tillämpa offentliga upphandlingar när man planerar och bygger nya banor vilket har lett till en situation där man har flera olika system på olika banor runt om i landet. I4 fyller i att man även kan ha olika system på samma sträcka men att man inte ser detta som något problem då kravbilderna man har är att systemen ska vara kompatibla med varandra.

På frågan huruvida man ser detta som problematiskt vid lagerhållning av reservdelar och liknande menar I5 att det inte är något problem då mycket material så som linor fortfarande är samma oavsett system. Både I4 och I5 menar på att kravet om offentliga upphandlingar inom EU skapar denna situation och att man därefter får göra det bästa av situationen.

Parametrar avseende hastighet

S1 menar på att inspänningskrafterna har störst betydelse för högre hastigheter i ett system eftersom inspänningskrafterna styr vågutbredningshastigheten samt elasticiteten i hela systemet. S2 är inne på samma spår men menar krasst att Y-linorna är den största faktorn. System utrustade med Y-lina klarar sig bättre i högre hastigheter kontra system utan. Däremot så menar S2 att det även går att köra snabbt utan Y-lina genom att istället kompensera med en högre inspänningskraft. Detta menar både S1 och S2 gör att linarea måste utökas vilket ställer till det med systemets egenvikt samt arbetsmiljön för montörer.

I1, I2 och I4 menar å sin sida att det är strömavtagaren som är den komponent som i slutändan bestämmer hastigheten. Detta då, menar I2, strömavtagaren ständigt har kontakt med kontaktledningen vilket gör att det blir den mest kritiska punkten. I2 berättar vidare att inspänningskraften i systemen fås ut genom simuleringar där utvecklaren av systemet i stora drag testat sig fram till den mest lämpliga inspänningen.

Samtliga respondenter är dock eniga om att det är helheten och samspelet mellan strömavtagare och kontaktledningssystem som är faktorn som bestämmer slutlig hastighet i systemet.

Tekniska begränsningar

S2, I1, I2 och I4 menar samtliga att främst ekonomi och energiåtgång är de största problemen, och således inte själva kontaktledningen som är begränsande. Respondenterna menar att det går åt alldeles för mycket energi för att framföra tåg i högre hastigheter och att det därigenom inte blir ekonomiskt försvarbart med, som I2 menar, för liten tidsvinst kontra kostnaden och energiåtgången för den ökade hastigheten.

S2 och I2 menar båda att bättre underhåll och design av dagens strömavtagare teoretiskt sett skulle kunna öka hastigheten något. S2 menar dock på att begränsningarna i Sverige snarare beror på tekniska utmaningar inom svensk spårstandard snarare än i kontaktledningarna. S2 säger att *“det är ingen idé att mäta millimetrar i kontaktledningar i Sverige när det sätter sig centimetrar i spåret.”*

S1 menar att det nya systemet, SYT 21/27, säkerligen klarar högre hastigheter än vad som satts som gräns men att övriga komponenter, och då främst inom bana inte klarar högre. Det går att förbättra det bantekniska och därmed öka hastigheten, vilket kontaktledningen skulle klara, men då detta inte varit aktuellt på grund av kostnader så har just 320 km/h satts som gräns.

S1 förklarar vidare att livslängden minskar vid ökad hastighet på grund av slitage och att *“när man bygger ett nytt system ska det också hålla i 40-50 år utan att man ska behöva stänga av och renovera.”* S1 menar även att utvecklare alltid vill ha säkerhetsmarginaler för systemen och därigenom medvetet sänker maxhastigheten mot vad systemet egentligen skulle klara av.

S2 menar att gränsen på 320 km/h säkerligen satts då det inte är tänkt att köra snabbare men att det säkert skulle klara högre hastigheter vid behov. Samtidigt menar respondenten att det alltid måste finnas marginaler. Även antalet strömavtagare spelar stor roll för driften. S2 medverkade i elektrifieringen av järnvägen i Danmark där det byggdes system för 250 km/h men där det enbart går att köra i 180 km/h då de kör sammankopplade enheter med upp till fem strömavtagare vilket sänker toleranserna.

S2 förklarar vidare att det är viktigt att inte ska stirra sig blind på vad ett system har för gräns på ett papper. S2 menar att för denne är järnvägsteknik överlag *“en kedja med komplexa system och ingen kedja är starkare än sin svagaste länk”* och menar att höghastighetsbanor i andra länder har en annan spårstandard vilket bjuder in till att klara högre hastigheter.

S2 ser dock positivt på att Sveriges nya höghastighetsbanor ska ha bättre underhållsfönster vilket tillåter att det bibehålls en hög hastighet i systemet. Vidare återkommer respondenten till sitt tidigare resonemang kring att det säkerligen går att köra snabbare än 320 km/h med ett SYT 21/27-system.

I1 menar att hastigheten för RPS är satt till 400 km/h då det sannolikt är testat och simulerat att systemet tål den hastigheten. Samtidigt menar både I1 och I2 att ingen är intresserad att köpa in system med just 400 km/h som tänkt STH på en bana. I1 menar på genom att uppvisa en kapacitet om 400 km/h ges en bild av ett robust system som tillåter höga hastigheter.

I2 menar vidare att gränserna för maximal hastighet kan skilja sig från land till land då exempelvis Frankrike testat för antalet ljusbågar vid drift medans exempelvis Tyskland testat strömavtagarens kontaktkraft. Detta skulle teoretiskt sett göra att ett system som tillåter 400 km/h i Tyskland kanske tillåter 420 km/h i Frankrike och vice versa beroende på vilken metod som simuleras.

I4 menar att de begränsningar ett system har egentligen sitter i strömavtagaren. Respondenten menar att tågen behöver trycka upp strömavtagaren perfekt mot kontaktråden med en hårfin balans mellan för mycket och för lite. I4 anser att de mekaniska tål väldigt mycket och ser egentligen inga särskilda begränsningar i just kontaktledningen om det byggs robust och med hög inspänningskraft. I4 menar att de har kunnat köra 574 km/h i Frankrike med dagens kontaktledningsteknik.

Det nya systemet

S1 berättar att man i början diskuterade om STH på 350 km/h för de kommande banorna, men detta sänktes senare till det slutgiltiga kravet på 320 km/h.

Det grundläggande kravet för kommande svenska höghastighetsbanor har således varit att kunna framföra tåg i mål hastigheten 320 km/h samt att systemet ska vara robust och hålla länge. Samtidigt så har arbete pågått med att titta på felkällor inom dagens kontaktledning och försöka bygga bort dessa.

S1 menar vidare på att i grund och botten är SYT 21/27 mycket likt SYT 15/15. I det nya systemet blir det ett nytt tillsatsrör då det tillsatsrör som används idag inte uppfyller ställda krav i TSD Energi. Även så kallade låsta vikhjul införs då inspänningskrafterna blir så stora och ett eventuellt ras skulle vara förödande för anläggningen utan låsta hjul. Själva lösningen kring de låsta vikhjulen har ännu inte bestämts, förutom att utväxlingen ska vara 1:3. S2 anser också att väldigt mycket i själva hängverket är sig likt från SYT 15/15, men att ett byte av tillsatsrör till ett nyutvecklat för att möta de ökade krafterna i strömavtagarna som uppkommer vid högre hastigheter krävs. I övrigt så är det inspänningarna och placeringar av bärtrådar som ändras.

S2 menar att många beräkningar har gjorts kring det nya systemet. Vidare menar respondenten att likt framtagandet av SYT 15/15 så tittades från svenskt håll på RE250 och menar på att precis som de tyska systemen RE250 och RE330 är syskon så är SYT 15/15 och SYT 21/27 även de lite att se som syskon. Respondenten drar kopplingen kring att vid utveckling en ny bilmodell, tittas det på redan utvecklade bilar och studeras om vad som är bra och vad utvecklaren vill förändra vid framtagandet av sin egen modell.

S1 bekräftar att Trafikverket har sneglat på framförallt RE330-systemet (föregångare till SICAT HA) vid framtagandet av det nya SYT 21/27 med kunskapen om att det systemet fungerar bra. För att undvika att uppfinna hjulet på nytt har Trafikverket därför valt att hämta inspiration från ett redan välutvecklat och testat system.

S1 menar att det kanske skulle kunna gå att få upp hastigheten i dagens SYT 15/15-system, men att det i stor utsträckning beror på hur mycket linorna som används får spännas in. Med SYT 21/27 har det därför beslutats att gå ifrån kopparsilverlegering och istället använda sig av kopparmagnesiumlegering samt att bärlinans area har utökats för att få upp inspänningskrafterna i systemet. S2 menar här att om det skulle bytas tillsatsrör och öka inspänningskraften i kontaktråden på SYT 15/15-systemet så går det nog att öka hastigheten, men menar samtidigt att det i stora drag är just det som görs med SYT 21/27.

S1 flikar även in arbetsmiljöaspekten som tagits i beaktning vid framtagandet av det nya systemet. För att enklare montera och underhålla har det därför tagits fram en annorlunda lösning på vikterna i systemet. Istället för traditionella viktstenar kommer det istället att vara en solid vikt för att underlätta montage och underhåll. Det har även utvecklats en ny rörknut till utliggarna med en skruvdetalj som möjliggör enklare justering av systemets höjd vid byggnation och justering. Även mindre detaljer såsom klämmor och liknande har utvecklats då bärlinan är grövre än den som används i SYT 15/15.

Dagens teknik

S1, S2 och I4 är inne på att exempelvis, som S1 menar, ett nytt material i linorna som klarar högre inspänningar med liknande strömledningsförmåga men lägre vikt, skulle utveckla dagens system till högre hastigheter. I4 menar att dagens system utvecklades för väldigt många år sedan och att nya lösningar med dagens teknik inte är särskilt troliga. S2 återkommer dock till strömavtagare som fokuspunkten för framtiden, något som även I1 och I2 menar spelar in. Mer följsamma strömavtagare och bättre underhåll av dessa är något som S2, I1 och I2 menar vore viktigt för en vidareutveckling inom kontaktledning.

S2 och I2 menar samtidigt att det går att pressa systemen med högre hastigheter ytterligare men att ingen skulle vara villig att betala för det ökade slitaget det skulle innebära på materialet.

I1 menar att höghastighetsbanor byggs mer och mer runt om i världen allt eftersom krav ställs på att minska användandet av flyg. Problematiken uppstår dock, vilket även I2 instämmer i, när du kör i mer än ungefär 300 km/h eftersom den ökade energiförbrukningen vid högre hastigheter blir för hög i jämförelse till den intjänade tidsvinsten.

9 Intervjuanalys

Samtliga av de intervjuade är av uppfattningen att kontaktledningssystemen som används idag klarar en bit över den satta gränsen vad gäller hastigheter, dels genom säkerhetsmarginal men även då andra aspekter, där respondenterna uteslutande är inne på banteknik, spelar in. Således kan författarna sluta sig till att för kommande svenska höghastighetsbanor så är det inte kontaktledningen som sätter gränsen, då SYT 21/27, vilket visar sig i studien, är likt utländska system som har en högre maxhastighet.

Vidare anser de svenska respondenterna i högre utsträckning att inspänningskrafter och y-linor har större inverkan medan de utländska aktörerna mer är inne på att strömavtagaren är akilleshälen vad gäller hastighet i systemen. Däremot så menar flertalet av respondenterna att energiåtgången när STH överstiger cirka 300 km/h blir problematisk och att de därför inte ser någon vinning i att köra så mycket snabbare. Därav kan man således tänka sig att det inte är lönt att bygga kontaktledning för högre hastigheter än runt 300-350 km/h.

De svenska respondenterna är båda av uppfattningen att fördelarna i att äga systemet själv dels är ekonomisk, då Trafikverket kan lagerhålla reservdelar åt enbart ett system, dels att de får en symmetrisk byggd anläggning vilket underlättar för tekniker och projektörer. Detta menar dock respondenterna I4 och I5, som förvaltare, inte är ett problem. Känslan hos författarna är dock att respondenterna som förvaltare inte riktigt funderat på alternativet att ha ett och samma system på samtliga banor genom kravspecifikationer vid byggnation, något som Trafikverket som förvaltare istället har tänkt.

Överlag tycker respondenterna att det är intressant hur olika länder utvecklar och väljer sina eltekniska lösningar för höghastighetsjärnväg. En respondent är inne på att det egentligen mest handlar om att bli nöjd med ett system som möter den kravbild landet själv har och att det sedan spelar mindre roll hur landet sedan når resultaten.

De svenska respondenterna verkar överlag nöjda med den lösning Trafikverket kommit fram till genom SYT 21/27. Respondenterna menar att Trafikverket tagit inspiration från redan utvecklade system och sedan, med hjälp av befintligt SYT 15/15, skapat den lösning som är bäst ur ett ekonomiskt och driftsäkert perspektiv. Vidare är de svenska respondenterna de enda som nämner arbetsmiljö för montörer ute i fält, något som kan betyda att Sverige tänkt över situationen kring arbetsmiljö mer än vad internationella aktörer kanske gör.

10 Resultat

Jämförelsestudien utgick ifrån fem frågeställningar som presenteras i detta kapitel tillsammans med de slutsatser författarna har slutit sig till efter utförd litteratur- och intervjustudie.

- Vilka krav har Trafikverket haft för ett nytt kontaktledningssystem?

Då kommande höghastighetsbanor i Sverige är planerade att byggas för hastigheter upp till 320 km/h så har detta givetvis varit med i kravbilden kring vad framtida kontaktledning för banorna ska klara av. Trafikverket har utöver det, precis som S1 berättar i intervju, haft som målsättning att bygga bort felkällor som påträffats i befintliga kontaktledningssystem samtidigt som utgångspunkten varit att utveckla ett system som är robust. Vilka felkällor man byggt bort framgår dock inte, sannolikt då detta inte är information man vill gå ut med från Trafikverkets sida.

I kravbilden för SYT 21/27 har även materialval ingått, Trafikverket vill att systemet i så stor utsträckning som möjligt ska använda liknande material som idag används vid kontaktledningsbyggnationer i Sverige. Det innebär att många detaljer i exempelvis utliggare är lika vilket även ger en igenkänning för projektörer och tekniker.

- Vilka likheter samt för- och nackdelar har Trafikverkets nya system kontra andra, internationella system?

Trafikverkets nya SYT 21/27-system är en uppgradering från SYT 15/15-systemet på liknande sätt som Siemens Re330, idag SICAT HA, är en uppgradering från Re250 från vilket SYT 15/15 är utvecklat från. Trafikverket själva medger att Siemens system har varit en inspirationskälla vid framtagandet vilket gör att SYT 21/27 blir likt Siemens system.

SYT 21/27 använder sig av samma inspänningskrafter och samma linor som både SICAT HA samt RPS TracFeed ALU3000. Detta tillsammans med att samtliga tre nämnda system är uppbyggda med Y-linor gör att systemen är väldigt lika varandra vad gäller parametrar, vilket författarnas uträkningar även visar. Att Trafikverket vid utvecklandet av ett system tar till inspiration från andra aktörer är inget konstigt och sker säkerligen i många tekniska utvecklingsprojekt kring all världens komponenter och system.

Studien visar på en rad fördelar med framtagandet av ett eget system. Systemet som Trafikverket har tagit fram är, om än i annorlunda skepnad utomlands, robust och tåligt. I och med likheten i systemets utformning från föregångaren SYT 15/15, i vilken projektörer och montörer idag redan arbetar, kan det tänkas att kunskapssteget till SYT 21/27 är relativt litet.

- Vilka motiv har Trafikverket haft för att välja att göra ett eget system?

Trafikverket har haft som motiv att utveckla ett eget system för att förebygga, som de svenska respondenterna säger i intervjuer, en situation där Trafikverket skulle kunna få en mängd olika system på olika delsträckor. Genom att istället utveckla ett eget system och kravspecifiera detta i upphandlingar inför byggnation gör att Trafikverket får ett och samma system oavsett hur många deletapper Trafikverket väljer att bygga framtida höghastighetsbanor i. Detta i sin tur torde leda till en mer lönsam och enkel byggnation och drifhållning då projektörer, underhållstekniker och montörer enbart behöver utbildas på ett system och inte flera.

Att det nya tänkta systemet även använder samma material som i dagens system i stor utsträckning får ses som en fördel vad gäller lagerhållning för reservdelar, något som Trafikverket redan har en organisation för.

Resultatet av detta blir att Trafikverket får en bättre helhetsbild av sitt system och därför kan utveckla och förfinas sitt eget system hur man än önskar, detta eftersom man äger konstruktionen och inte behöver gå via en extern utvecklare vid förändringar.

- Vad är det som gör att det befintliga SYT 15/15-systemet inte räcker för att nå målhastigheten för Sveriges planerade höghastighetsbanor?

För att kunna nå målhastigheten med systemet SYT 15/15 skulle det krävas ett annat material i linor och trådar för att få ner systemets egetyngd och därmed få en ökad vågutbredningshastighet. Det är möjligt att det finns linor med lägre vikt som samtidigt klarar av inspänningskrafterna på 15 kN, men med slitage ställs samtidigt krav på att linorna ska hålla i längden. Därav aktuellt materialval för system SYT 15/15.

Med de linareor och inspänningskrafter som används i SYT 15/15 nås inte de hastigheter som kommande höghastighetsbanor är planerade för. Författarna visar i beräkningar i Tabell 6, kapitel 7.1, att systemet med marginalen på 70% av vågutbredningshastigheten, skulle klara av hastigheter på upp till 298 km/h vilket inte möter kravbilderna på 320 km/h för kontaktledningssystemet på kommande höghastighetsbanor. Även fast respondenterna i studien tror att det går att pressa systemet ytterligare så skulle slitaget på ett SYT 15/15-system bli allt för olönsamt om systemet skulle trafikerats i hastigheter upp mot 298 km/h som systemet teoretiskt sett klarar av.

Att därför, så som Trafikverket nu gör, utveckla ett system med högre inspänningskrafter och grövre linarea är således den utveckling som krävs för att möta hastighetskraven på kommande höghastighetsbanor.

- Vilka tekniska begränsningar, avseende på största tillåtna hastighet, finns i ett kontaktledningssystem?

De tekniska begränsningarna som finns i kontaktledningssystemen är främst inspänningskraft och vilka linor systemet använder sig av. För att kunna köra fort krävs höga inspänningskrafter vilket i sin tur ställer krav om brottgränser och liknande materialegenskaper på systemets linor.

Det som teorin i studien visar är att kontaktledningssystemens egenskaper bygger på en komplex blandning av spannlängd, vikt på linor, inspänningskrafter osv. Det går således att teoretiskt bygga kontaktledningssystem med dagens teknik för väldigt höga hastigheter, något som i skrivande stund hastighetsrekordet om 574,8 km/h vittnar om.

11 Metoddiskussion

I detta kapitel redogör författarna för hur studiens datainsamling har fungerat och vad som eventuellt skulle kunna göras bättre.

11.1 Litteraturstudie

De skriftliga källorna till denna studie bygger på tillverkares systembeskrivningar, rådande krav och standarder samt av böcker på området. Då väldigt mycket av de råd och krav som använts i studien är konfidentiella har processen för att få fram materialet varit relativt krångligt. Godkännande att använda konfidentiella material har fåtts skriftligen via epost av samtliga i studien medverkande tillverkare.

Flertalet standarder har varit på, för författarna, främmande språk. I jakt på svenska motsvarigheter har författarna använt sig av handledare och tidigare kollegor med tillgång till en del av standarder och dokument.

11.2 Intervjuer

Författarna är överlag nöjda med respondenternas medverkan men inser även att språkbarriärer med de utländska respondenterna kan ha påverkat kvalitén på studien. Främst med respondenten nämnd som I4 då denne intervjuades med tolk utan teknisk bakgrund vilket ledde till en del ofullständiga svar på de frågor som författarna hade. På grund av rådande pandemiska läge i världen så skedde samtliga intervjuer på distans, något som författarna tycker är lite tråkigt då de tror att fysiska möten hade gett mer. Även aspekter som studiebesök till testanläggningar föll bort på grund av situationen.

Då frågorna var av varierande grad öppnade detta även upp för vidare diskussioner under intervjuerna vilket författarna anser gav respondenternas egna tankar ett bra utrymme igenom hela intervjun.

12 Framtida studier

Då Trafikverkets kommande SYT 21/27-system vid författande av denna studie fortfarande är under utveckling kan vissa förändringar ske efter att författarnas arbete avslutats. Författarna har under arbetets gång haft kontinuerlig kontakt med utvecklare av systemet men är införstådda med att det pågående arbetet med systemet av olika skäl eventuellt inte delges fullt ut.

Nedan följer författarnas förslag för vidare undersökning kring ämnet studien behandlar samt en förklaring till förslagen:

- En ekonomisk kalkyl gällande kostnader och vinster av Trafikverkets utveckling av ett eget system.

Som myndighet följer ett ansvar till att behandla skattemedel adekvat. Att därför närmare utreda vad det hade kostat Trafikverket att köpa in ett färdigt system kontra att utveckla ett eget system över lång sikt anser författarna hade varit intressant.

- En analys kring energiåtgången för höghastighetståg, där studien behandlar hur mycket energi det går åt för olika hastigheter som sedan jämförs.

Respondenterna i studien menar att energiåtgången för högre hastigheter är olönsam och att det därför vid högre hastigheter istället väljs alternativ så som exempelvis Maglev-teknik. Författarna tycker det vore intressant att analysera vid vilka hastigheter denna kritiska gräns för olönsamhet går vad gäller tidsvinsten av högre hastigheter kontra ökade energikostnader. Detta kan sedan exempelvis jämföras med vilken energiåtgång och tidsvinst det finns mot en flygresa om samma sträcka.

- Vidare forskning och utredning kring material och komponenter inom ett kontaktledningssystem.

Kontaktledningssystemen är uppbyggda med en rad olika komponenter som har olika material så som stål, aluminium och koppar. Författarna anser att det vore intressant att göra en fördjupning och vidare forskning på området om exempelvis systemens tillsatsrör kan göras ännu bättre än dagens för att på så sätt exempelvis minska elasticiteten ytterligare.

13 Referenser

Elektroniska referenser

European copper institute. *CuMg0,5* <http://conductivity-app.org/alloy-sheet/11> (hämtad 2021-04-30)

Skriftliga referenser

Banverket (2006). *Lärobok kontaktledning introduktion*. EL 06/45. Borlänge: Banverket.

https://www.trafikverket.se/contentassets/c418e82fd2a1456a93d0b8c55dba2583/larobok_kontaktledning_introduktion.pdf (hämtad 2021-05-03)

Bårström, S & Granbom, P. (2017). *Den svenska järnvägen*. 4 uppl., Borlänge: Trafikverket. ISBN: 978-91-7467-227-5.

Elcowire rail. *Railway catenary systems catalogue*. Hettstedt: Elcowire rail GmbH.

https://elcowire.com/wp-content/uploads/ELCOWIRE_RAIL_web.pdf (hämtad 2021-05-03)

Europaparlamentets och rådets beslut (EU) 2008/284/EG av den 6 mars 2008 om *teknisk specifikation för driftskompatibilitet (TSD) avseende delsystemet Energi i det transeuropeiska järnvägssystemet för höghastighetståg*, EU 2008/284: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/SV/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008D0284&from=SV> (hämtad 2021-04-30)

Hayden, S., Dahlblom, O., Olsson, A. & Sandberg, G. (2017). *Introduktion till Strukturmekaniken*. 5:2 uppl., Lund: Studentlitteratur AB.

Järnvägsskolan (2011a). *Kontaktledning grundläggande montage BEKTL1 kurspärm*. Ängelholm: Järnvägsskolan

Järnvägsskolan (2011b). *Kontaktledning ledningssystem, kopplingar BEKTL2 kurspärm*. Ängelholm: Järnvägsskolan

Kießling, F., Puschman, R. & Schmmieder, A. (2001). *Contact Lines for Electric Railways*. München: Publicis KommunikationsAgentur GmbH GWA.

Patel, R & Davidsson, B. (2011). *Forskningsmetodikens grunder*. 4:1 uppl., Lund: Studentlitteratur AB.

SIS (2012). *SS-EN 50149:2012 Järnvägsanläggningar–Fasta installationer–Profilerad kontaktledningstråd av koppar och kopparlegering*. Stockholm: Svenska institutet för standarder.

Sverigeförhandlingen (2017). *Slutrapport från Sverigeförhandlingen Infrastruktur och bostäder – ett gemensamt samhällsbygge*. (SOU 2017:107) Stockholm: Näringsdepartementet.

https://www.regeringen.se/4afeba/contentassets/1299d9b5e4d24843ad132316569d036c/sou-2017_107_webb_total.pdf (hämtad 2021-05-03)

Opublicerade referenser

ADIF (2021). *Overhead Catenary System C – 350 Technical features*. ADIF-D.DE PROYECTOS DE RED CONVENCIONAL - Subdirección de Superestructura, Gerencia de Área de Energía. Madrid: ADIF [Internt material]

Rail Power Systems GmbH (2020). *TracFeed® ALU3000 Contact line system - SYSTEM DESCRIPTION*. München: Rail Power Systems GmbH [Internt material]

Siemens (2005). *Sicat HA Contact Line for High Speed Main-line Railways Version 1.0.0*. Erlangen: Siemens AG Transportation Systems Electrification [Internt material]

Svensson, T. (2014). *ÖSB TEKNISKT PM VINDRESTRIKTIONER KONTAKTLEDNING* [Internt material]

Trafikverket (2014). *Kontaktledningsinventering Sverige* [Internt material]

Trafikverket (2020a). *Elkraftanläggning Kontaktledning SYT 15/15 Systembeskrivning*. (TRVINFRA-00084) Borlänge: Trafikverket [Internt material]

Trafikverket (2020b) *Elkraftanläggning Kontaktledning Trådföring* (TRVINFRA-00144) Borlänge: Trafikverket. [Internt material]

Trafikverket (2020c). *Systemparametrar och förutsättningar SYT21/27 version 4.4*. (UHte 16:086) Borlänge: Trafikverket [Internt material]

Figurförteckning

Figur 1 - Thulin, B. (2019). Föreläsning - Järnvägens elkraftförsörjning. *Järnvägens elanläggningar*. [Illustration]

Figur 2 - Banverket (2007). *Strömkretsen i kontaktledningssystemet*. [Illustration]

Figur 3 - Thulin, B. (2019). Föreläsning - Järnvägens elkraftförsörjning. *Kontaktledningsstolpe*. [Illustration]

Figur 4 - Thulin, B. (2019). Föreläsning - Järnvägens elkraftförsörjning. *Inspänningsanordning av kontaktledning*. [Illustration]

Figur 5 - Appelholm, M. (2021). *Spannlängdminskning i kurvor*. [Illustration]

Figur 6 – Thulin, B. (2019). Föreläsning - Järnvägens elkraftförsörjning. *Funktionen av kontakttråd*. [Illustration]

Figur 7 – Banverket (2006). *Separata avspänningar*. [Illustration]

Figur 8 – Banverket (2006). *Funktion av Y-lina*. (Modifierad av Larsson, G 2021) [Illustration]

Figur 9 - Järnvägsskolan (2011a). Lärobok BEKTL1. *Utliggares uppbyggnad*. [Illustration]

Figur 10 - Banverket (2006). *Utliggare med namn på mått*. [Illustration]

Figur 11 - Järnvägsskolan (2011a). Lärobok BEKTL1. *Skillnad i utliggares utförande*. [Illustration]

Figur 12 – Thulin, B (2019). Föreläsning - Järnvägens elkraftförsörjning. *Kontaktledningens sicksackmönster*. [Illustration]

Figur 13 - Banverket (2006). *Konduktivitet för olika legeringar*. [Illustration]

Figur 14 - Banverket (2006). *Kontaktledningselasticitet för olika system*. [Illustration]

Figur 15 - Appelholm, M. (2021). *Dopplereffekten*. [Illustration]

Figur 16 – Banverket (2006). *Strömavtagare*. [Illustration]

14 Bilagor

14.1 Bilaga I - Intervjufrågor till S1

Övergripande frågor:

- Hur länge har du jobbat med kontaktledning? Vad har du för erfarenheter inom området?
- Vad har du för utbildning?
- Hur skulle du vilja beskriva dina arbetsuppgifter?
- Hur ser arbetsgången ut vid framtagandet av ett nytt system?
- Vilken parameter är speciellt viktiga att ta hänsyn till, avseende på hastigheten? Uppföljning: Varför?

Partspecifika frågor

- Vad har din roll varit i att ta fram det nya systemet?
- Vilka specifika krav har man haft vid framtagandet av SYT 21/27?
- Vad var det tänkta hastighetsmålet vid framtagandet?
- Vad är det som gör begränsningen i systemet till 320 km/h?
- Vad tror du det beror på att liknande system med samma inspänningskrafter som SYT 21/27 klarar av högre hastigheter?
- Varför väljer man olika inspänningskrafter på kontaktlina och bärlinan?
- Varför har man inte samma på båda som i 15/15?
- Skulle det gå att göra om befintligt 15/15 på något sätt för att öka hastigheten i det systemet, utöver det ni gör med 21/27?
- Vad finns det för fler skillnader mellan 15/15 och 21/27 förutom linarea och inspänningskraft?

Avslutande frågor

- Vad skulle ni anse vara den största tekniska begränsningen för dagens kontaktledningssystem vad gäller hastighet?
- Hur långt tror du att man med dagens teknik kan komma med kontaktledning? Har vi nått maxhastighet?
- Hur tror du att framtidens kontaktledning kommer skilja sig från dagens?

14.2 Bilaga II - Intervjufrågor till S2

Övergripande frågor:

- Hur länge har du jobbat med kontaktledning? Vad har du för erfarenheter inom området?
- Vad har du för utbildning?
- Hur skulle du vilja beskriva dina arbetsuppgifter?
- Hur ser arbetsgången ut vid framtagandet av ett nytt system?
- Vilken parameter är speciellt viktiga att ta hänsyn till, avseende på hastigheten? Uppföljning: Varför?

Partspecifika frågor:

- Vad har din roll varit i att ta fram det nya systemet?
- Har du gjort några beräkningar för det nya systemet?
Uppföljning: Vilka?
- Vad tror du gör att begränsningen i systemet SYT21/27 är satt till 320 km/h?
- Vad tror du det beror på att liknande system med samma inspänningskrafter som SYT 21/27 klarar av högre hastigheter?
- Skulle det gå att göra om befintligt 15/15 på något sätt för att öka hastigheten i det systemet, utöver det ni gör med 21/27?
- Vad finns det för fler skillnader mellan 15/15 och 21/27 förutom linarea och inspänningskraft?

Avslutande frågor:

- Vad skulle ni anse vara den största tekniska begränsningen för dagens kontaktledningssystem vad gäller hastighet?
- Hur långt tror du att man med dagens teknik kan komma med kontaktledning? Har vi nått maxhastighet?
- Hur tror du att framtidens kontaktledning kommer skilja sig från dagens?

14.3 Bilaga III - Intervjufrågor till I1, I2 samt I3

Övergripande frågor:

- How long have you been working with catenary systems? What are your experience in the field?
- What is your education?
- How would you describe your occupation?
- How does the work regarding development of a new system look like?
- Which parameters would you say is the most critical ones regarding speed in a catenary system?

Follow up: Why?

Partspecifika frågor:

- According to system parameters, your system is capable of higher speed than other available systems with similar tension forces etc. How come?
- What would you say makes your system better than your “rivals”?
- Any cons in your system compared to others?
- What are your visions for the future when it comes to high speed catenary?

Avslutande frågor:

- What would you consider the greatest limitation is when it comes to today's technology in catenary systems?
- How far would you say today's technical solutions can reach? Have we reached the top speed in catenary systems?
- What do you think tomorrow's catenary system will look like?

14.4 Bilaga IV - Intervjufrågor till I4 samt I5

Övergripande frågor:

- How long have you been working with catenary systems? What are your experience in the field?
- What is your education?
- How would you describe your occupation?
- Which parameters would you say is the most critical ones regarding speed in a catenary system?
Follow up: Why?

Partspecifika frågor:

- Are you developing any own system?
- According to system parameters, your system has higher tension force on contact wire than other, international systems. How come?
- Any cons in your system compared to others when it comes to tensile forces etc?
- How does the work regarding development of a new system look like?
- What are the pros and cons to develop your own system?
- Do you have any specific demands when developing a new system?
- Any specific parameter to think of when in a warm climate country?
- What are your visions for the future when it comes to high speed catenary?

Avslutande frågor:

- What would you consider the greatest limitation is when it comes to today's technology in catenary systems?
- How far would you say today's technical solutions can reach? Have we reached the top speed in catenary systems?
- What do you think tomorrow's catenary system will look like?