

Yngve Hamnerius AB

Elektriska och magnetiska fält från spårvägstrafik i Uppsala



Revision 2

Datum 2020-01-26

Ansvarig handläggare: Yngve Hamnerius

Innehållsförteckning

SAMMANFATTNING	3
1 INLEDNING	5
2 ELEKTROMAGNETISKA FÄLT	6
2.1 ELEKTRISKA FÄLT	7
2.2 MAGNETISKA FÄLT	7
2.3 FÄLTENS AVSTÅNDSAVTAGANDE.....	10
2.4 NATURLIGA FÄLT	11
2.5 MAGNETISKA FÄLT FRÅN KONVENTIONELL SPÅRVÄG.....	12
2.5.1 Mätning av magnetfält från spårvagnstrafik	12
2.6 VAGABONDERANDE STRÖMMAR	15
3 HÄLSOEFFEKTER OCH GRÄNSVÄRDEN FÖR LÅGFREKVENTA FÄLT.....	18
3.1 AKUTA EFFEKTER AV STRÖM.....	18
3.2 AKUTA EFFEKTER AV FÄLT	18
3.3 CANCER.....	18
3.4 PÅVERKAN PÅ NERVSYSTEMET	21
3.5 HÄLSOEFFEKTER AV STATISKA FÄLT	22
3.6 RIKTVÄRDEN OCH REKOMMENDATIONER FÖR HÄLSOEFFEKTER AV LÅGFREKVENTA FÄLT	23
3.7 BEDÖMNING AV FÄLTEN FRÅN SPÅRVÄGSTRAFIK	26
4 PRINCIPER FÖR UPPBYGGNAD AV SPÅRVÄG	28
4.1 UPPBYGGNAD AV KONVENTIONELL SPÅRVÄG	28
4.2 UPPBYGGNAD AV SPÅRVÄG MED LADDTEKNIK	28
5 ELEKTROMAGNETISKA FÄLT KRING SPÅRVÄG	30
5.1 STÖRNING AV JORDMAGNETISKA FÄLTET PÅ GRUND AV STÅL I SPÅRVAGNEN	30
5.2 STÖRNING AV FRAMDRIVNINGSSYSTEMET I VAGNEN	34
5.3 STÖRNING PÅ GRUND AV STRÖMMATNING TILL VAGNEN	35
6 REDUKTION AV ELEKTROMAGNETISKA FÄLT FRÅN SPÅRVÄG	41
6.1 REDUKTION AV ELEKTRISKA FÄLT.....	41
6.2 REDUKTION AV MAGNETISKA FÄLT	41
6.2.1 Reduktion av magnetfält från strömmatningen vid konventionell spårväg	42
6.2.2 Magnetfält på grund av vagabonderande strömmar	42
6.2.3 Användning av annan matning än kontaktledning.....	43
6.2.4 Metoder för att minska längden på den magnetfältsalstrande slingan använd i Kringentunneln Göteborg.....	44
6.2.5 Metoder för att minska längden på den magnetfältsalstrande slingan använd i Lunds spårväg	46
6.3 LÄCKSTRÖMMAR OCH GALVANISK KORROSION	49
6.4 REDUKTION AV MAGNETFÄLT FRÅN MATARSTATIONER.....	49
6.5 SKÄRMNING AV MAGNETFÄLT	50
7 ELMILJÖKRAV VID UPPHANDLING OCH KONTROLL AV FORDON	51
8 DISKUSSION OCH SLUTSATSER	53

Yngve Hamnerius AB

Sammanfattning

Uppsala kommun planerar bygga spårväg som skall gå från en ny station vid Bergsbrunna, över Fyrisån till Ultuna och Gottsunda. Från Gottsunda mot Uppsala centralstation via bland annat Rosendal och Ulleråker, och stora arbetsplatser som bland annat Akademiska sjukhuset, Sveriges lantbruksuniversitet (SLU), Uppsala science park och Biomedicinskt centrum (BMC).

Denna rapport behandlar elektriska och magnetiska fält som alstras vid spårvagnstrafik. Magnetfält kan ge upphov till störningar i viss avancerad teknisk apparatur. Då spårvägen bl. a. planeras gå genom sjukhus och universitetsområdet är det viktigt att den utformas så att dessa störningar minimeras.

Rapporten behandlar magnetfält från konventionell spårvägstrafik och med modifierad kontaktledning liksom spårvagn med laddteknik (batteri, superkondensator eller bränslecell).

Rapporten visar att spårvagnar med laddteknik ger lägst magnetfältsstörning.

Traditionell spårvägstrafik med kontaktledning alstrar elektriska och magnetiska fält. Den huvudsakliga källan till elektriska fält är den spänningssatta kontaktledningen. Detta fält finns oavsett om det går någon trafik eller inte. De magnetiska fälten uppstår huvudsakligen av den ström som flyter i kontaktledningen och åter i rälererna. Det innebär att det bildas magnetfält kring spårvägen när det går trafik. Fälten uppstår inte endast där spårvagnen befinner sig, utan även utefter banan, längs den väg som strömmen matas.

Fältet från kontaktledningen kan reduceras genom att minska arean på den slinga som bildas av kontaktledning och räls.

Oavsett vilken lösning som väljs, konventionell spårvagn eller med laddteknik, kommer man att få en störning av det jordmagnetiska fältet på grund av stålet i spårvagnen. Denna störning inte så stor och har ingen större utsträckning

En spårväg som drivs med 750 V likspänning alstrar huvudsakligen elektriska och magnetiska fält som kommer att vara av statisk karaktär (DC-fält).

De elektriska fälten skärmas av normala byggnadsmaterial och de har inte en sådan styrka att de innebär något problem. Magnetiska fält skärmas däremot inte av normala byggnadsmaterial.

Forskning antyder att växelomagnetfält, som t.ex. alstras av det svenska elkraftnätet, möjligen är cancerframkallande. Det är främst för barnleukemi man sett förhöjda risker. Myndigheterna har därför formulerat en försiktighetsprincip för att begränsa fälten. Likspänningsmatad spårväg alstrar DC-fält och endast mycket låga växelomagnetfält. Det finns inget som tyder på att DC-fält ökar riskerna för cancer.

Det är viktigt att krav på magnetfält beaktas vid projektering och drift av spårvagnanläggningar. Det är också viktigt att spårvägens matarstationer utformas så att de avger låga magnetfält speciellt i de fall de byggs in i byggnader med bostäder eller verksamheter där personer vistas stadigvarande.

Vid upphandling av fordon skall krav ställas på EMC (ElectroMagnetic Compatibility) enligt EU-krav och elektromagnetiska fält enligt Strålsäkerhetsmyndighetens

Yngve Hamnerius AB

rekommendationer. Dessutom bör krav på magnetfält enligt försiktighetsprincipen ställas för platser i fordonen där människor vistas.

Foto framsida: Batteridrivna spårvagn i Nanjing Kina.

Yngve Hamnerius AB

1 Inledning

Uppsala kommun planerar bygga spårväg som skall gå från en ny station vid Bergsbrunna, över Fyrisån till Ultuna och Gottsunda. Från Gottsunda mot Uppsala centralstation via bland annat Rosendal och Ulleråker, och stora arbetsplatser som bland annat Akademiska sjukhuset, Sveriges lantbruksuniversitet (SLU), Uppsala science park och Biomedicinskt centrum (BMC).

Denna rapport behandlar elektriska och magnetiska fält som alstras vid spårvagnstrafik. Magnetfält kan ge upphov till störningar i viss avancerad teknisk apparatur. Då spårvägen bl. a. planeras gå genom sjukhus och universitetsområdet är det viktigt att den utformas så att dessa störningar minimeras. Denna rapport är en kunskapsöversikt över elektromagnetiska fält vid spårvägstrafik. Kunskapsöversikten ska tjäna som ett övergripande underlagsmaterial för arbete med detaljplaner och/eller förstudier för spårväg i Uppsala kommun.

Exakt utformning av spårvägen är i dagsläget inte klar. Man undersöker möjligheten av att använda fordon med laddteknik där man kan tänka sig batterier, superkondensatorer eller bränsleceller, eftersom vi idag inte vet vilken teknik som är bäst lämpad år 2027.

Man undersöker också en mer traditionell uppbyggnad där spårvägen att försörjs med 750 V likström, distribuerad via kontaktledning och likriktarstationer. Man kan även tänka sig en kombination av båda möjligheterna genom att ha sektioner i spårvägsnätet utan kontaktledning i särskilt störkänsliga områden.

Olika tänkbara strömförsörjningssystem skall belysas. När spårvagnarna framförs kommer det att alstras fält från spårvagnarna men också från strömmatningen via kontaktledning och räls. När det gäller elektromagnetiska fält är det två huvudsakliga aspekter som bör beaktas vid spårvägstrafik.

- Kan de alstrade fälten orsaka tekniska störningar på egen och andras apparatur och vilka konsekvenser kan dessa störningar få?
- Innebär de alstrade fälten en hälsorisk för personer i spårvagnen eller för personer som vistas i närheten av spårvägen? Såväl lång- som kortvarig exponering av elektromagnetiska fält skall beaktas.

Dessa aspekter behandlas i rapporten, liksom lagstiftning och gränsvärden, kravställande avseende fält vid upphandling av spårväg.

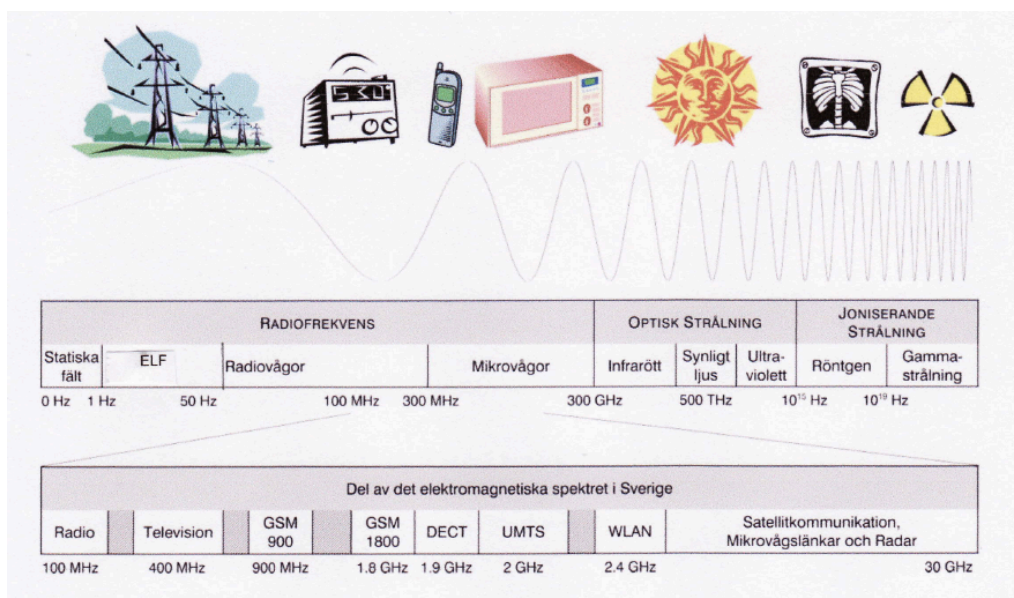
2 Elektromagnetiska fält

Så länge som människan har existerat har vi varit utsatta för naturliga elektromagnetiska fält. Men det var inte förrän i början av 1900-talet som man började utnyttja elektriciteten, sedan dess har vi sett en kontinuerlig ökning av användningen.

Elektriska och magnetiska fält kan karakteriseras av sin styrka och frekvens. Frekvensen anges i hertz (Hz), som anger hur många fältstyrkemaxima fältet har per sekund. Det elektromagnetiska spektrumet som sträcker sig från statiska fält via låga frekvenser, som kraftfrekvensen 50 Hz, vidare via radiofrekvens, mikrovågsfrekvens, infrarött, synligt och ultraviolett ljus upptill röntgen och gammastrålning, se figur 2.1. Frekvensområdet 1 Hz till 300 Hz kallas ELF (Extremely Low Frequency) och innefattar bland annat kraftfrekvensen, vilken är 50 Hz i Sverige samt tågfrekvensen som i Sverige är 16,7 Hz.

Synligt ljus intar en särställning då vi kan se elektromagnetiska fält av dessa frekvenser, övriga delar av spektrumet är osynligt. Det finns dock mätinstrument för samtliga delar av spektret. Merparten av de fält som finns i vår närmiljö är av relativt låg intensitet och låg frekvens.

Spårvägar drivs vanligen med likström, varvid det uppstår huvudsakligen statiska fält (0 Hz).



Figur 2.1 Det elektromagnetiska spektrumet.

Man definierar fältets våglängd som avståndet, i meter, mellan två vågtoppar. Mellan frekvens och våglängd råder ett bestämt förhållande, nämligen att produkten av dessa, (våglängden x frekvensen), är lika med vågens utbredningshastighet. Denna hastighet är lika ljusets hastighet (300 000 km/s) för alla typer av elektromagnetiska vågor. Låg frekvens svarar mot lång våglängd och hög frekvens mot kort. Vid 50 Hz är våglängden 6000 km, i radiofrekvensområdet några meter, i mikrovågsområdet några centime-

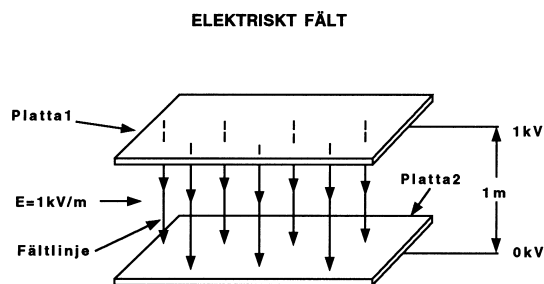
Yngve Hamnerius AB

ter och i ljusområdet mikrometer. Vid 0 Hz kan vi inte tala om någon våglängd, då den skulle varit oändligt lång.

Elektromagnetiska fält består av elektriska och magnetiska fält. På avstånd som är större än ca en våglängd från källan uppstår en så kallad plan elektromagnetisk våg med vinkelrät elektrisk och magnetisk fältkomponent. För fält från spårvagnar så är vi mycket närmare källan än en våglängd. I det fallet finns det inget bestämt samband mellan det elektriska och magnetiska fältet, varför vi bör använda oss av den elektriska respektive magnetiska fältstyrkan istället för det elektromagnetiska fältets styrka för att karakterisera spårvägens fält.

2.1 Elektriska fält

Elektriska fält beror på spänningar; fältet går från en spänning till en annan. Styrkan på det elektriska fältet anges i volt/meter (V/m). Om man har två plåtar som i figur 2.2 och den ena har spänningen 0 V och den andra 1 kV (kilovolt = 1000 V) så blir den elektriska fältstyrkan, E , lika med spänningsskillnaden, U (= 1 kV) dividerat med avståndet, d (= 1 m), dvs. 1 kV/m. Detta innebär att alla spänningssatta föremål alstrar elektriska fält.

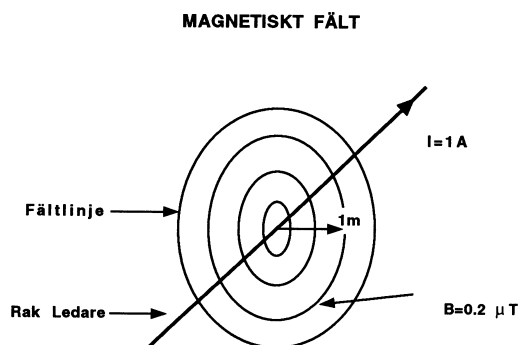


Figur 2.2 Ett elektriskt fält uppstår mellan föremål som har olika spänning. Den elektriska fältstyrkan (E) är lika med spänningsskillnaden delat med avståndet mellan föremålen.

2.2 Magnetiska fält

Elektriska fält alstras av spänningar, de magnetiska fälten alstras däremot av strömmar. Vi tar ett enkelt exempel, en rak ledning som det går en ström i, se figur 2.3. Runt ledningen skapas ett magnetiskt fält. De elektriska fältlinjerna går från en spänning till en annan, de magnetiska fältlinjerna bildar däremot alltid slutna banor runt om de strömmar som alstrar dem. Styrkan på de magnetiska fälten, den magnetiska flödestätheten, mäts i tesla (T). 1 tesla är en mycket stor enhet. När det gäller normal miljö får vi ta till mikrotesla (μT), milliondels tesla och nanotesla (nT), milliarddels tesla.

Yngve Hamnerius AB



Figur 2.3 Magnetiska fält bildar slutna fältlinjer kring strömförande ledare. Den magnetiska flödestätheten (B) uppgår till $0,2 \mu\text{T}$, en meter från en ledare, som för strömmen (I) 1 A .

Om vi låter en ström, I , gå genom ledaren i figur 2.3, får vi en magnetisk fältstyrka, H , på avståndet, r .

$$H = \frac{I}{2\pi \cdot r} \quad (\text{A/m}) \quad (2.1)$$

Den magnetiska flödestätheten B är,

$$B = \mu \cdot H \quad (\text{T}) \quad (2.2)$$

där μ är en materialkonstant, permeabiliteten (Vs/Am). Permeabiliteten för vakuum brukar betecknas μ_0 , den har värdet $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs/Am}$. Nästan alla material har en permeabilitet med värde mycket nära μ_0 . Detta gäller för normala byggnadsmaterial, biologisk vävnad och de flesta metaller. Endast magnetiska material som järn har en permeabilitet som avviker kraftigt från μ_0 . För material med permeabilitet μ_0 blir flödestätheten från ledaren i figur 2.3:

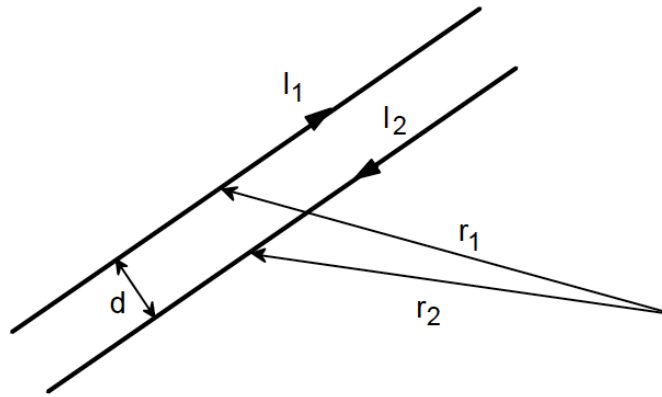
$$B = \mu_0 \cdot H = \frac{2 \cdot 10^{-7} I}{r} \quad (\text{T}) \quad (2.3)$$

Om det går en ström på 1 A , i figurens ledare, får vi en magnetisk flödestäthet på $0,2 \mu\text{T}$ en meter ut från ledaren. Vi ser att för normala strömstyrkor blir flödestätheten mycket mindre än 1 T . Är strömmen en likström bildas ett statiskt fält, är det en växelström bildas ett magnetiskt växelfält.

När vi har en tvåledare, där strömmen I går fram i den ena ledaren och samma ström går tillbaka i den andra ledaren, kommer dessa båda strömmar att ge upphov till motriktade magnetfält som delvis tar ut varandra. Magnetfältet från en tvåledare med avståndet d mellan ledarna, enligt figur 2.4, blir om strömmen I_1 går i den ena ledaren och en returström I_2 går i den andra ledaren:

$$B = \frac{\mu \cdot I_1}{2 \cdot \pi \cdot r_1} + \frac{\mu \cdot I_2}{2 \cdot \pi \cdot r_2} \quad (\text{T}) \quad (2.4)$$

Yngve Hamnerius AB



Figur 2.4 Magnetiskt fält från en tvåledare där den ena ledaren för en ström I_1 och den andra ledaren en returström I_2 . Vinkelräta avståndet till ledarna är r_1 respektive r_2 .

Om vi skriver om med gemensamt bråkstreck och ansätter att $I_2 = -I_1$, dvs. fram och returström lika stora, får vi:

$$B = \frac{\mu \cdot I_1 \cdot r_2 - \mu \cdot I_1 \cdot r_1}{2 \cdot \pi \cdot r_1 \cdot r_2} \quad (\text{T})$$

(2.5)

Om avståndet d mellan ledarna är mycket mindre än r_1 och r_2 så kan man approximera

$$r_2 - r_1 \approx d \quad r_2 \approx r_1 \approx r$$

$$B \approx \frac{d \cdot \mu \cdot I_1}{2 \cdot \pi \cdot r^2} \quad (\text{T})$$

(2.6)

Vi ser att magnetfältet blir direkt proportionellt mot d och omvänt proportionellt mot avståndet i kvadrat. En vanlig lampsladd innehåller två ledare, en som för strömmen till lampan och en som för strömmen tillbaka. Dessa två ledare kommer att skapa motriktade fält som nästan helt tar ut varandra, om ledarna ligger tätt tillsammans (d litet). Är ledarna långt från varandra, som avståndet mellan kontaktledning och räl vid spårvägstrafik, får vi ett större magnetfält.

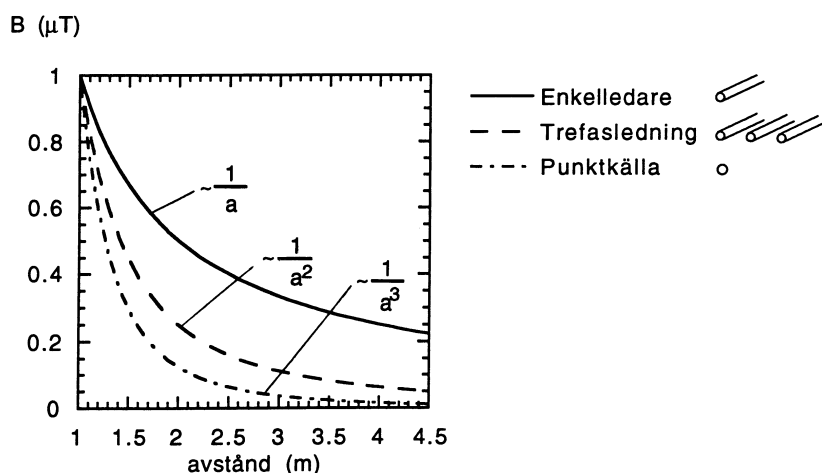
- Elektriska fält alstras av spänningsskillnader
- Magnetiska fält alstras av elektriska strömmar
- Likspänning ger elektrostatiska fält
- Växelspänning ger elektriska växelfält
- Likström ger statiska magnetfält
- Växelström ger magnetiska växelfält

2.3 Fältens avståndsavtagande

Både de elektriska och magnetiska fälten avtar med avståndet från källan. Avståndsavtagandet är emellertid olika för olika källor. Som framgår av avsnitt 2.1 avtar det elektriska fältet med ett genom avståndet ($1/r$), från en (oändligt) stor platta. Fälten avtar snabbare från mindre föremål. På några decimeters avstånd från en bildskärm avtar det elektriska fältet ungefär kvadratisk med avståndet ($1/r^2$), medan det avtar kubiskt, från en liten punktkälla ($1/r^3$).

Det magnetiska fältet från en oändligt lång rak enkelledare avtar med ett genom avståndet ($1/r$), se ekvation 2.1 och 2.3. Ekvation 2.6 visar att fältet från en tvåledare avtar ungefär kvadratisk med avståndet ($1/r^2$). Detta gäller även för trefasledningar, som kraftledningar och skenförband. Magnetfältet avtar kubiskt ($1/r^3$) från en punktkälla som en liten transformator eller motor. I figur 2.5 visas fältavtagandet för några olika källor.

Källornas olika fältavtagande innebär att källor som elektriska småapparater kan ge betydande fältbidrag på nära håll, men att bidraget på några meters avstånd ofta är försumbart på grund av det starka avståndsavtagandet. Stora strukturer som kraftledningar och vagabonderande strömmar¹, i t ex vattenledningar som råkar föra ström, kan däremot ge betydande fältbidrag även på större avstånd, på grund av det svagare avståndsavtagandet. Speciellt enkelledaren, som faller med den vagabonderande strömmen i t.ex. vattenledningen, får en stor utsträckning på grund av det långsamma avståndsavtagandet.



Figur 2.5. Magnetfältavtagande för olika källor. Från en enkelledare avtar fältet endast med ett genom avståndet, från två motriktade strömmar (som kontaktledning och räls) och från trefasledningar avtar fältet med kvadraten på avståndet och från en punktkälla, som en liten elmotor eller transformator, avtar fältet med kubiken på avståndet.

Då alla strömmar normalt bildar slutna slingor, finns det alltid någon ström, som går åt andra hållet och ger ett motriktat fält. Det innebär att den ensamma enkelledarströmmen endast existerar som en teoretisk abstraktion. I verkligheten beror fältstyrkan och avståndsavtagandet på avståndet mellan fram och återgående strömmar. Om avståndet till en enkelledare är mycket kortare än avståndet till återgångsströmmen så blir avståndsavtagandet approximativt $1/r$ i detta område.

¹ Vagabonderande strömmar förklaras i avsnitt 2.6.

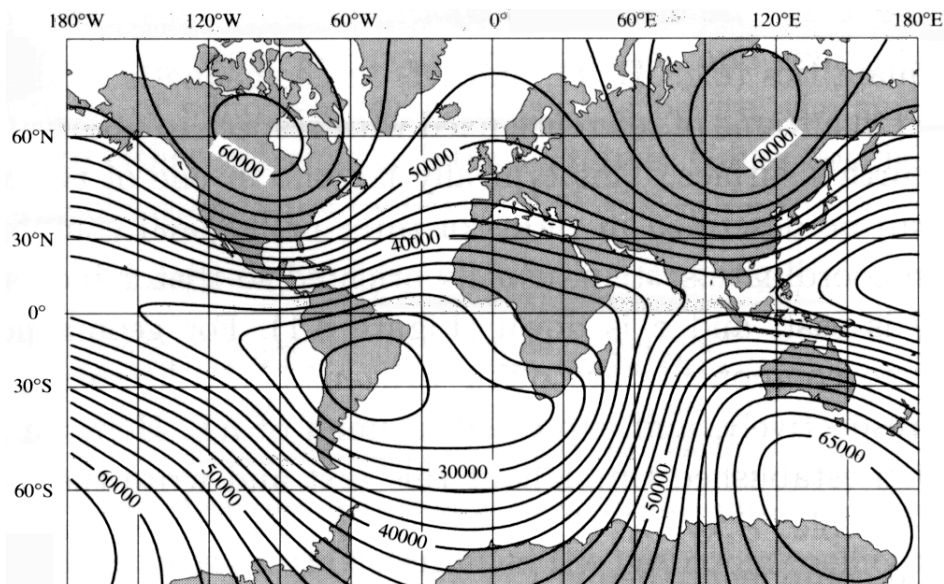
Yngve Hamnerius AB

Magnetfältet från strömmatningen till spårvagnar avtar normalt med kvadraten på avståndet från spåret eftersom vi har en framgående ström i kontaktledningen och en återgångsström i rälen. Då vanligtvis alla spårvägsräl sitter ihop elektriskt (och är jordade) innebär det att återgångsströmmen i rälen kan välja olika vägar om man har ett maskat spårvägsnät. Ett spårvägsnät kan antingen ha en trädstruktur med grenar som inte möter andra grenar eller vara maskat, dvs. det finns förbindelser mellan olika grenar av nätet. När vi utförde dygnsloggningar av magnetfält från spårvägen i Göteborg såg vi magnetfält vid en spårvägslinje även efter det att den sista vagnen gått för natten, på den sträckningen. Dessa magnetfält berodde på att återgångsströmmar, från spårvagnar på andra sträckningar, delvis transporterades utefter linjen vi mätte vid. En sådan återgångsström är långt ifrån matningsströmmen i den aktuella kontaktledningen där spårvagnen går, varför den kan betraktas som en enkelledarström. Dess magnetfält kommer att ha ett avståndsavtagande på $1/r$.

2.4 Naturliga fält

I naturen förekommer naturliga elektriska och magnetiska fält, dessa är huvudsakligen statiska fält. Om spårvagnarna drivs med likström kommer det att bildas statiska magnetfält i spårvägens närhet. Dessa magnetfält kommer att överlagras på det jordmagnetiska fältet som i Uppsala är ca $50 \mu\text{T}$. Det jordmagnetiska fältet varierar över jorden, se figur 2.6.

I atmosfären uppstår det ett elektriskt fält, vid vacker väderlek är fältstyrkan vid marknivå typiskt 100 V/m , när ett åskmoln passerar uppstår stora variationer under molnet, fältstyrka varierar mellan $100 - 3000 \text{ V/m}$.



Figur 2.6 Bilden visar det jordmagnetiska fältets styrka i nT ($1000 \text{ nT} = 1 \mu\text{T}$) för olika platser på jorden. Varje isolinje ligger på ett avstånd av $2,5 \mu\text{T}$ från närmaste linje. Av bilden framgår att flödestätheten i Uppsala är ca $50 \mu\text{T}$ ($50\,000 \text{ nT}$)².

² Magnetic field of Earth based on International Geomagnetic Reference Field 1990 (Blakely)
http://gravmag.ou.edu/mag_earth/mag_earth.html

Yngve Hamnerius AB

De fält som uppstår vid spårvagnsdrift, som drivs med likspänning, är normalt inte av större styrka än de naturligt förekommande fälten. Skulle spårvägen istället drivas av växelspanning kommer de alstrade fälten överstiga de naturliga fälten, då växel-magnetfältet från naturliga källor knappast förekommer.

2.5 Magnetiska fält från konventionell spårväg

Konventionell spårväg matas med en likspänning på 750 V via kontaktledning. En likström (betecknas DC = Direct Current) på typiskt 1000 A matas från kontaktledningen, via spårvagnen och åter via rälsen. Det innebär att det uppstår ett statiskt elektriskt fält från kontaktledningen. När en spårvagn drivs på linjen kommer det att gå en ström som alstrar ett magnetfält. Detta innebär att det bildas magnetfält vid spåret, inte endast när spårvagnen passerar, utan också under den tid som den matas via kontaktledningen.

Man brukar benämna detta fält för ett DC-magnetfält då det är alstrat av en likström (kan även benämnas statiskt magnetfält, men denna benämning är mindre lämplig då styrkan på magnetfältet varierar med strömpådraget i spårvagnen). Även de elektriska apparaterna inne i vagnen som motorer etc. ger upphov till fält. Dessa källor inne i vagnen avtar dock snabbt med avståndet (tredjepotensen på avståndet) varför det framförallt är passagerare och förare som utsätts för dessa fält.

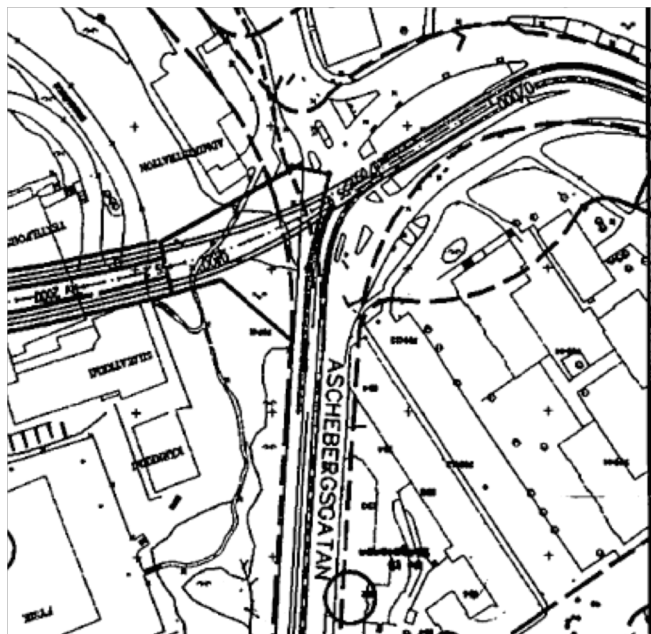
I hus som ligger nära ledningen har spårvagnens egna fält avtagit så att det är den matande spänningen och strömmen i kontaktledningen samt återgångsströmmen i räl, som alstrar det dominerande fältet. Det elektriska fältet skärmas av byggnadsmaterialen i husets tak och väggar, medan det magnetiska fältet inte dämpas av normala byggnadsmaterial.

2.5.1 Mätning av magnetfält från spårvagnstrafik

Vid projekteringen av en spårvägstunnel under Chalmers i Kringenprojektet genomförde jag i samverkan med Göteborg Energi Nät AB mätningar av magnetfält vid Chalmers. Bakgrunden var att elektromagnetiska störningar befarats från den planerade spårvägstunneln i lokaler i tunnelns omgivning.

Mätningar av det magnetiska DC-fältet utfördes 1999 på fyra platser inom Chalmersområdet i anslutning till den planerade tunneln. En mätpunkt var i dåvarande institutionen för Installationsteknik på Aschebergsgatan 55 i Göteborg. Denna mätning redovisas nedan, då den representerar ett hus med befintlig konventionell spårväg utanför huset. Mätpunkt låg 0,5 m innanför fasad, på bottenplan, cirka 5 m från spårvägen, se figur 2.7.

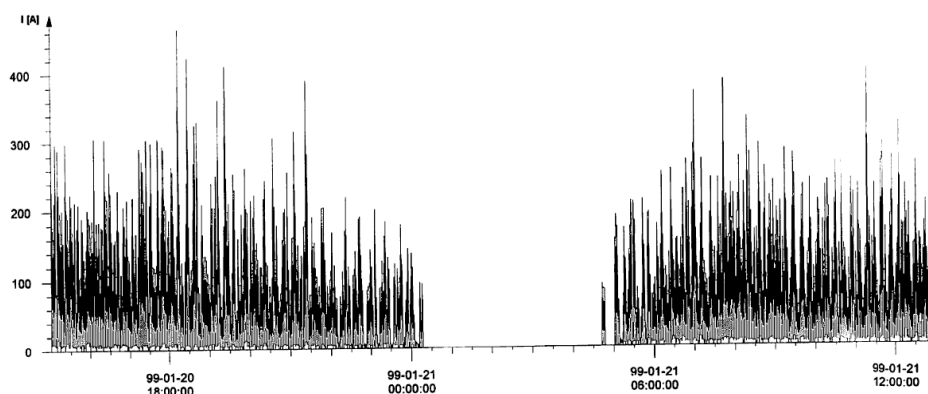
Yngve Hamnerius AB



Figur 2.7 Magnetfältsmätningen utfördes i Institutionen för Installationstekniks lokaler vid Aschebergsgatan, markerat med cirkel.

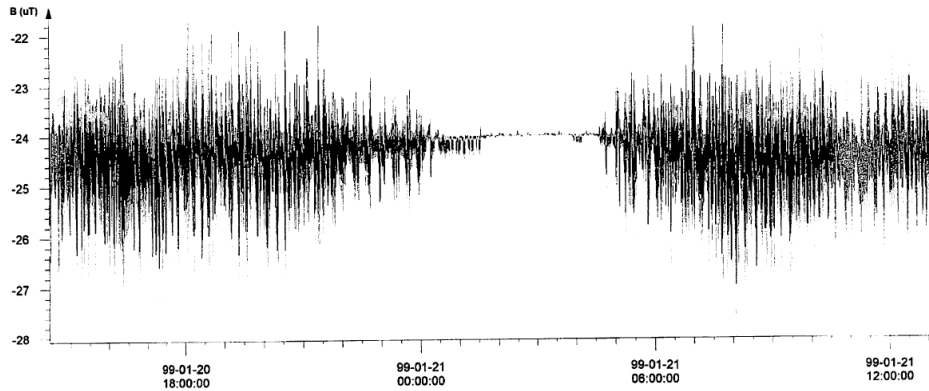
DC-magnetfältet loggades i tre vinkelräta riktningar under 24 timmars tid, dessutom registrerades det kraftfrekventa fältet. Strömmen i den matande likriktarstationen till kontaktledningen respektive rälsen registrerades också.

Matningen utfördes med en magnetfältsmätare av fluxgatetyp, fabrikat Barlington MAG 03 MC, som mäter DC-magnetfältet. Växelströmsfältets absolutvärde uppmättes med en Radians Innova BMM-3, magnetfältsmätare. Mätningarna redovisas i figurerna 2.8 – 2.12.

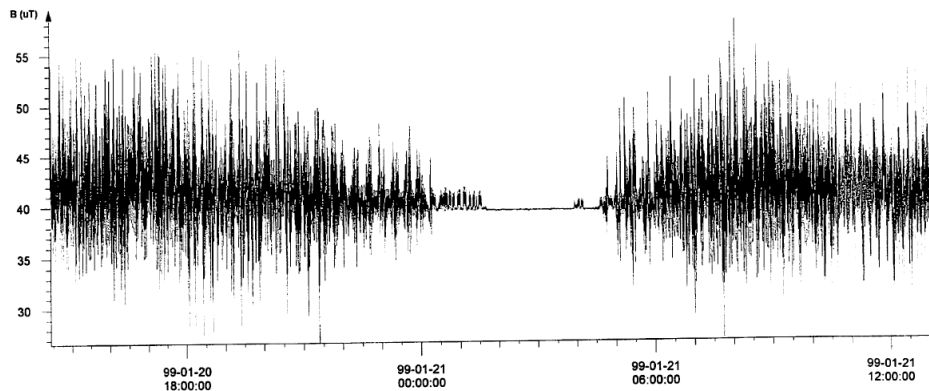


Figur 2.8, Registrering av strömmatning till spårväg på Aschebergsgatan, mätningen gjordes i en av två parallella matningskablar varför den totala matningsströmmen är dubbelt så stor.

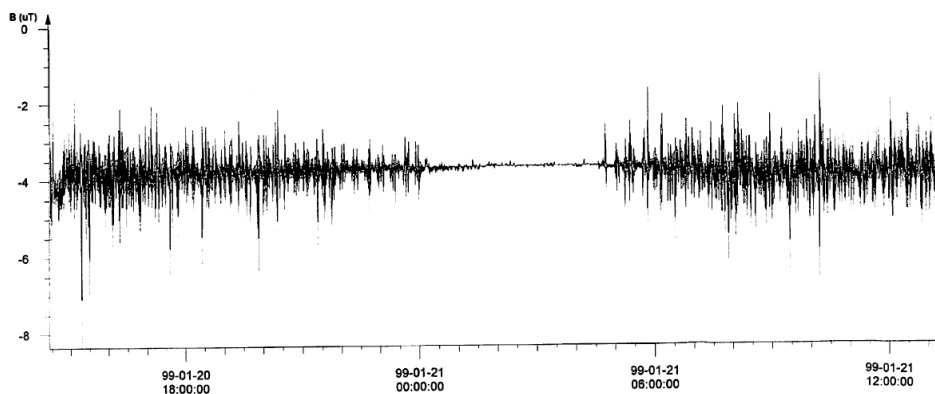
Yngve Hamnerius AB



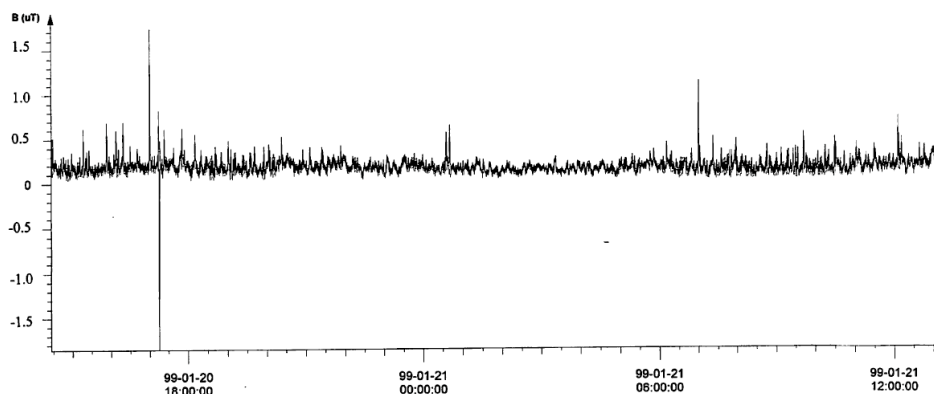
Figur 2.9, Registrering av DC-magnetfält i x-led (horisontellt mot syd) i en mätpunkt på Institutionen for Installationsteknik, Aschebergsgatan 55.



Figur 2.10, Registrering av DC-magnetfält i y-led (vertikalt) i en mätpunkt på Institutionen for Installationsteknik, Aschebergsgatan 55.



Figur 2.11, Registrering av DC-magnetfält i z-led (horisontellt mot ost), i en mätpunkt på Institutionen for Installationsteknik, Aschebergsgatan 55.



Figur 2.12, Registrering av växel magnetfält (5 Hz – 2000 Hz), i en mätpunkt på Institutionen för Installationsteknik, Aschebergsgatan 55.

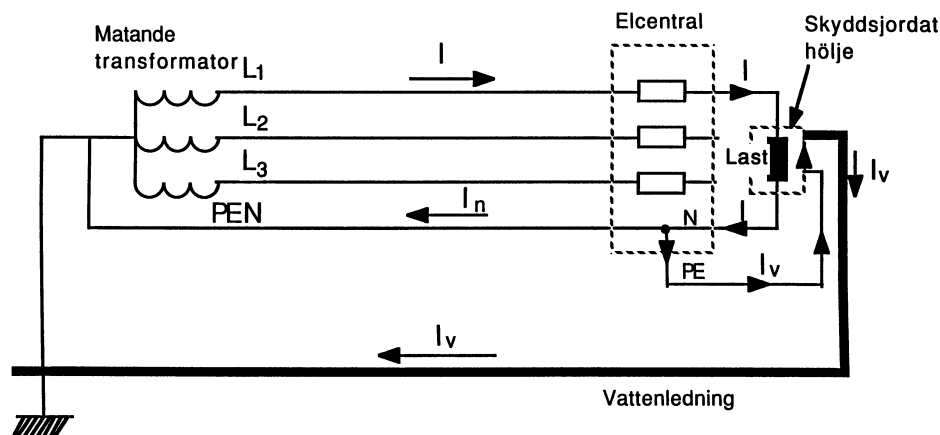
Mätningarna visar att i omedelbar närhet av spårväg varierade DC-magnetfältet med upp till $30 \mu\text{T}$ i vertikalled och $5 \mu\text{T}$ i horisontalled. Strömmen varierade från 0 till 460 A, vilket i verkligheten motsvarar 0 - 920 A (mätning i den ena av två kablar). Ett klart samband ses mellan fältet och matningsströmmen.

Under natten, då spårvägstrafiken ligger nere, varierar fältet i y-led mellan $39,5$ och $39,8 \mu\text{T}$. En trolig förklaring till variationen under natten är spårvägstrafik på andra linjer, där en liten andel av returströmmen tar vägen via rälererna i Aschebergsgatan.

Växel magnetfältet ligger omkring $0,2 \mu\text{T}$, med vissa variationer. Nivåerna är något lägre på natten vilket kan bero på lägre 50 Hz strömförbrukning. Eventuellt beror minskningen också på avbrottet i spårvägstrafiken under natten. Spårvägen matas med DC ström, men strömmen är inte perfekt likriktad, varför en svag växelströmskomponent kan finnas.

2.6 Vagabonderande strömmar

Källan till förhöjda växel magnetfält i stadsmiljö, är i de flesta fall, vagabonderande strömmar. Dessa strömmar beror på att vi i Sverige vanligen har ett elsystem med fyra ledare, i servisledningen fram till huset. Figur 2.13 visar ett fyrledarsystem. Servisledningen består av tre fasledare L_1 , L_2 och L_3 , samt en kombinerad skyddsjord och neutralledare, så kallad PEN-ledare (PE = Protective Earth, N = Neutral). Efter elcentralen finns fasledarna och separata skyddsjordledare och neutralledare. De senare är förbundna med varandra i elcentralen.



Figur 2.13 Bild av ett 4-ledarsystem. Återgångsströmmen från fasledarna kan gå två vägar från elcentralen eftersom skyddsjordledaren är sammankopplad med neutralledaren. Dels via den gemensamma PEN-ledaren dels via andra metalliska ledare som är förbundna med skyddsjord som vattenledningen.

Strömmen I , som uppkommer då man ansluter en enfaslast, har två vägar att gå tillbaka från elcentralen till den matande transformatorns jordpunkt. Om det finns en metallisk förbindelse, t.ex. en vatten- eller fjärrvärmeledning kan återgångsströmmen dels gå via PEN-ledaren I_n , som det är tänkt, dels via skyddsjorden I_v och vattenledningen och åter till transformatorns jordpunkt. Om det går ström i vattenledningen, alstras det ett magnetfält kring den, men även kring elledningen, då det felar återgångsström, varför magnetfälten från elledningen inte längre tar ut varandra.

Hur mycket av återgångsströmmen som går i PEN-ledaren och hur mycket som går i vattenledningen, bestäms av motstånden i PEN-ledaren, respektive i den alternativa strömvägens ledare. Vi får en strömdelning, där störst ström går den väg som har minst motstånd, enligt Kirchoffs lag.

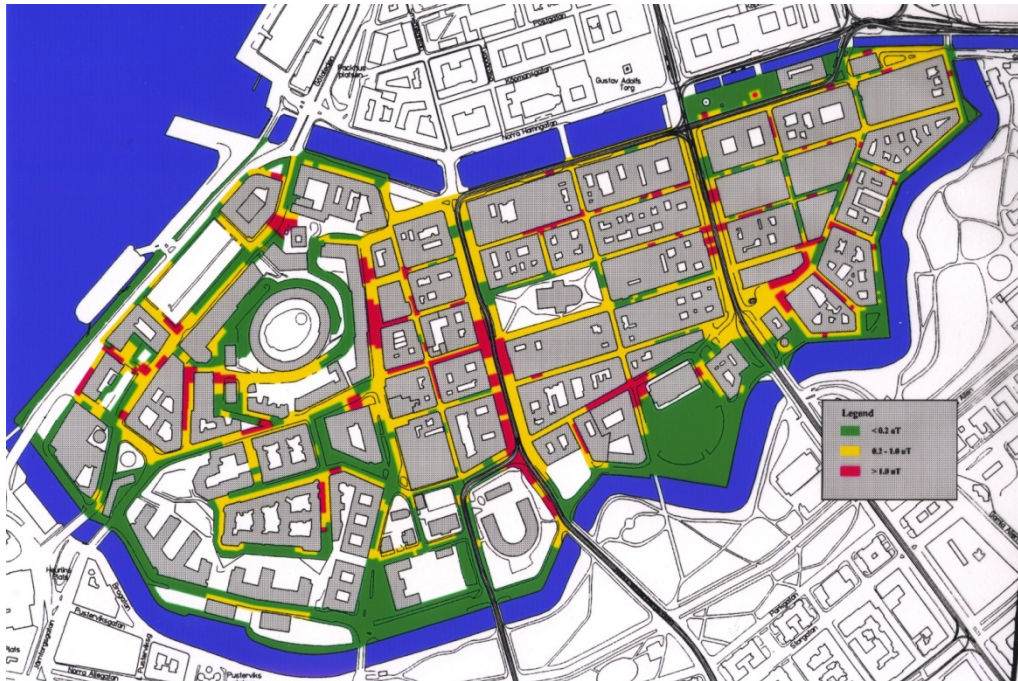
Vattenledningen har ofta en större metallarea, än PEN-ledaren, varför motståndet kan vara lägre i vattenledningen, då kommer störst ström att gå den vägen. De rör som används för fjärrvärme har ofta stora areor varför dessa är utmärkta ledare. Då återgångsströmmarna ofta rör sig om tiotals ampere är det inte ovanligt att finna vagabonderande strömmar av denna storleksordning.

Strömmen i PEN-ledaren bestäms av den totala strömmen i de tre faserna. I ett idealt trefassystem kommer strömmarna i de tre faserna att ta ut varandra, om de är lika stora. I PEN-ledaren och vattenledningen kommer endast att gå en ström som beror på skillnaden i fasbelastning. Varje enfaslast som slås till eller från, ändrar återgångsströmmen och den vagabonderande strömmen och därmed magnetfältet. Därför varierar ofta magnetfältet kraftigt med tiden i hus med vagabonderande strömmar.

När vi inför ett spårvägsnät skapar vi fler goda ledare som är jordade (rälerna). Dessa ledare kan komma att transportera vagabonderande 50 Hz strömmar från elnätet som kommer att alstra 50 Hz magnetfält kring rälerna. Vi kan alltså få växel-magnetfält från rälerna på grund av vagabonderande strömmar från elnätet, trots att spårvägen i sig inte alstrar några 50 Hz fält om den drivs med likspän-

Yngve Hamnerius AB

ning. Nu skall man inte överdriva dessa problem, i stadsmiljö är spårvagnsrälsen bara en av många metalliska ledare som kan leda vagabonderande strömmar. I figur 2.14 visas en mätning av kraftfrekventa magnetiska fält längs gatorna i Göteborgs centrum som uppmäts av elever på Chalmers.



Figur 2.14. Kraftfrekventa magnetfält mätt 1 m över mark på gatorna i stadsdelen innanför vallgraven i Göteborg. Magnetfältsnivåerna har färgats grönt <math>< 0,2 \mu T</math>, gult $0,2 - 1,0 \mu T$ och rött $> 1,0 \mu T$.

De högsta magnetfälten (> 1 μT) som är utmärkta med röd färg i figuren, förekommer relativt frekvent på de gator som har spårvägstrafik, men det finns andra gator som inte har spårvägstrafik som har lika höga nivåer. Observera att mätningen avser magnetfält i frekvensområdet 30 Hz – 2000 Hz, så de uppmätta fälten avser inte de fält som alstras av spårvägstrafiken, då den drivs med likström i Göteborg.

En stor del av de uppmätta växelomagnetfälten orsakas av vagabonderande 50 Hz-strömmar.

3 Hälsoeffekter och gränsvärden för lågfrekventa fält

Sedan man tog elektriciteten i bruk har man känt till att direkt ström genom kroppen ger akuta effekter, som i värsta fall kan leda till döden. Synen på om svaga elektriska och magnetiska fält har någon hälsoskadlig inverkan, har däremot ändrats de senaste årtiondena.

3.1 Akuta effekter av ström

Det är sedan länge känt, att det finns hälsorisker vid direktkontakt med spänningsförande föremål. Om man vid kontakt med en elektrisk strömkrets, får ström genom kroppen, kan strömmen excitera (starta) nervsignaler, som i värsta fall kan leda till hjärtstillestånd. Om man tar i ett spänningsförande föremål och samtidigt är i kontakt med jordpotential, kommer det att gå en ström genom kroppen. Redan en ström på 0,1 mA ger upphov till obehag³. En starkare ström kan trigga nervsignaler, vilket kan leda till kramp, så att man inte kan släppa det spänningsförande föremålet. I värsta fall kan även hjärtat påverkas så att det slutar slå. Det krävs inte speciellt starka strömmar för att man skall drabbas av kramp. Medianvärdet på strömstyrkan som kan ge kramp för en vuxen kvinna är 11 mA och för en vuxen man 16 mA. För ett litet barn kan redan 5 mA innebära livsfara.

3.2 Akuta effekter av fält

Ett yttre elektriskt eller magnetiskt växelfält kommer att alstra ett inducerat elektriskt fält i människokroppen som driver strömmar i kroppen. Detta inre inducerade elektriska fält kan, precis som vid direktkontakt, excitera nervsignaler. Det krävs starka yttre fält för att detta skall ske. Den vävnad som är känsligast är näthinnans nervbanor. Här kan yttre magnetfält trigga nervsignaler i näthinnan som upplevs som ljusblixtar, så kallade magnetofosfener. Störst känslighet är vid frekvensen 20 Hz. Starkare fält kan excitera nerver i både det centrala och perifera nervsystemet. För att skydda mot dessa effekter har ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) tagit fram rekommendationer. De fältnivåer som uppstår av spårvägstrafik, ligger under ICNIRPs rekommenderade värden, varför sådana akuta effekter som excitering av nervvävnad, inte skall uppkomma.

3.3 Cancer

Synen på om svaga elektriska och magnetiska fält har någon hälsoskadlig inverkan, har ändrats de senaste åren. De svaga fält man exponeras för i hem och kontorsmiljö, inducerar svaga strömmar i kroppen. Styrkan på dessa strömmar är inte större än de strömmar som finns naturligt i kroppen av t.ex. hjärtats aktivi-

³ Suess, M. & Benwell-Morison, D. (1989) "Nonionizing Radiation Protection" Second edition, WHO Regional Publ. European Series No. 25, Copenhagen.

Yngve Hamnerius AB

tet. Med anledning av att de av fälten inducerade strömmarna är så låga bedömde forskarna allmänt att hälsorisker av dessa fält var mycket osannolika.

Ett första tecken på att denna bedömning kanske var felaktig kom 1979. Då publicerades en studie, där man funnit en korrelation mellan barncancer och kraftfrekventa magnetfält i hemmen⁴. När denna rapport kom, möttes den av ett utbrett misstroende. Den ledde dock till att flera liknande studier genomfördes. När resultaten från de flesta av upprepningsstudierna också gav resultat som tydde på ett samband mellan magnetfält och barncancer, började en omprövning att göras.

Vid studier av vuxencancer och magnetfältsexponering i hemmiljö har man i de flesta studierna inte funnit något samband med fält⁵.

Det finns numera ett stort antal studier av personer som yrkesmässigt exponeras för kraftfrekventa fält. Studierna bygger i allmänhet på information om yrkestitlar som telegraf och radiooperatörer, aluminiumsmältverksarbetare, spårvagns- och tågförare, ställverks- och linjearbetare etc. I endast ett fåtal av studierna har man genom mätningar försökt fastställa den egentliga exponeringen som individen alternativt yrkesgruppen utsatts för. Data om exponering för andra faktorer i arbetsmiljön som kan vara cancerframkallande saknas också i flertalet av dessa studier. Det är framförallt leukemi och hjärntumörer som undersökts i dessa studier. Leukemiundersökningarna kan delas upp i studier av leukemi som dödsorsak respektive sjukdomsorsak. Majoriteten av studierna av leukemi som dödsorsak visar inte korrelation till yrkesexponering medan man däremot finner en sådan korrelation i de flesta studierna av leukemi som sjukdomsorsak. Resultaten från studierna av hjärntumörer visar en mer spridd bild.

Under 1992 presenterades två svenska studier, dels den s.k. närboendestudien, dels en studie av cancer och yrkesexponering för magnetfält. I närboendestudien undersöktes alla barncancerfall, samt leukemier och hjärntumörer hos vuxna, för den del av befolkningen som bor mindre än 300 m från 220 och 400 kV 50 Hz-ledningar. Resultaten var att man fann ett dos-respons samband mellan beräknad magnetfältsexponering och barnleukemier. Signifikant förhöjda barnleukemirisker observerades vid exponering för kraftfrekventa magnetfält över 0,2 μT ⁶. I denna studie fann man ingen korrelation mellan vuxenexponering i bostäder och leukemi eller hjärntumörer. Forskargruppen gick vidare och förfinade sitt exponeringsmått till beräknad magnetfältsdos under en tioårsperiod före diagnostillfället. Med denna metod finner man en ökad vuxenleukemirisk för dem vars beräknade dos överstiger 2 $\mu\text{T}\text{år}$ ⁷.

⁴ Wertheimer, N. & Leeper, E. (1979) "Electrical wiring configurations and childhood cancer" *Am. J. of Epidemiology*, **109**: 273-284.

⁵ Hardell, L., Holmberg, B., Malker, H & Paulsson, L.-E. (1995) "Exposure to low frequency electromagnetic fields and the risk of malignant diseases - an evaluation of epidemiological and experimental findings" *European J. of Cancer Prevention*, **4**, Suppl 1: 3-107.

⁶ Feychting, M. & Ahlbom A. (1993) "Magnetic fields and cancer in people residing near Swedish high voltage power lines". *Am. J. Epidemiol.*, **138**: 467-81.

⁷ Feychting, M. & Ahlbom A. (1994) "Magnetic fields leukemia, and central nervous system tumors in Swedish adults residing near high voltage power lines" *Epidemiology* **5**: 501-509.

Yngve Hamnerius AB

I en svensk studie⁸ av yrkesexponering av män och cancer har man med hjälp av dosimetrar mätt exponeringen över en arbetsdag för fall och kontroller. I denna studie ser man samband mellan yrkesexponering för magnetfält och leukemier samt ett något svagare samband för hjärntumörer. De nivåer där man ser riskökningar, ligger vid 0,2-0,3 μ T. Dessa båda studier har ingått i ett nordiskt program. Motsvarande danska studier av barncancer⁹ och yrkesexponering¹⁰ och cancer visade samma tendenser, men med svagare signifikans. Den finska barncancerstudien fann inga signifikanta överrisker¹¹.

Ser man internationellt har man fått störst samstämmighet i resultaten från studier av exponering för kraftfrekventa magnetfält och barnleukemi. Trots detta kan resultaten från även dessa studier tolkas på olika sätt, då flertalet, i och för sig, finner ökade barnleukemirisker, men i många fall är dessa riskökningar ej statistiskt säkerställda. En möjlig förklaring till att många resultat inte är statistiskt säkerställda, är att det är få barnleukemifall, i varje studie, varför siffrorna blir osäkra. Att det är få barnleukemifall beror på att barnleukemi, tack och lov, är en mycket sällsynt sjukdom.

För att få ett säkrare bedömningsunderlag, samarbetade författarna till nio barncancerstudier, varvid de lade samman sina rådata, till en sammanslagen (pooled) analys¹². I denna sammanslagna analys, ser man en statistiskt säkerställd, drygt fördubblad barnleukemirisk, vid medlexponeringar över 0,4 μ T. Man ser inga riskökningar under nivån 0,4 μ T. Materialet är så stort, att författarna menar att det inte är sannolikt att riskökningen skulle kunna bero på slumpen. Men de påpekar samtidigt att det aldrig är möjligt att bevisa ett orsakssamband, med hjälp av epidemiologiska undersökningar, varför det är ej möjligt att utesluta, att en annan faktor, skulle kunna ligga bakom riskökningen.

Epidemiologiska studier kan aldrig **bevisa** ett orsakssamband mellan en faktor och en sjukdom, för detta behövs djurförsök. I en översiktsartikel skriver Löscher och Mevissen¹³ att det samlats allt mer bevis för att det i försöksdjur som exponerats för kraftfrekventa magnetfält erhålls en cancerpåverkan. Men att bevisen fortfarande är för svaga för att fastlägga ett orsak-verkansamband. Flera av djurförsöken tyder på att magnetfält skulle kunna vara en bidragande faktor för

⁸Floderus, B., Persson, T. Stenlund, C., Wennberg, A., Öst, Å. & Knave, B. (1993) "Occupational exposure to electromagnetic fields in relation to leukemia and brain tumors: a case control study in Sweden" *Cancer Causes Control*, **4**: 465-76.

⁹Olsen, J., Nielsen, A. & Schulgen, G. (1993) "Residence near high voltage facilities and risk of cancer in children" *B. M. J.*, **307**: 891-895.

¹⁰Guénel, P., Raskmark, P., Bach Andersen, J. & Lynge, E. (1993) "Incidence of cancer in persons with occupational exposures to electromagnetic fields in Denmark" *Br. J. Ind. Med.*, **50**: 758-764.

¹¹Verkasalo, P., Pukkala, E., Hongisto, M., Valjus, J., Järvinen, P., Heikkilä, K. & Koskenvuo, M. (1993) "Risk of cancer in Finnish children living close to power lines" *B. M. J.*, **307**: 895-899.

¹²Ahlbom A, Day N, Feychting M, Roman E, Skinner J, Dockerty J, Linet M, McBride M, Michaelis J, Olsen JH, Tynes T & Verkasalo PK. (2000) A pooled analysis of magnetic fields and childhood leukemia. *British Journal of Cancer* 83:692-698.

¹³Löscher, W. & Mevissen, M. (1994) "Animal studies on the role of 50/60-hertz magnetic fields in carcinogenesis" *Life Sciences*, **54**: 1531-1543.

Yngve Hamnerius AB

brösttumörutveckling¹⁴. Löschers grupp har arbetat med djurförsök och i dessa sett en ökad bröstcancerfrekvens hos magnetfältsexponerade djur¹⁵. Vid uppreningsstudier vid Batellelaboratoriet i USA, har man dock ej lyckats upprepa dessa resultat¹⁶.

Man måste sätta in dessa eventuella överrisker i sitt sammanhang. Vi har cirka 200 barncancerfall om året i Sverige, de uppskattningar som gjorts tyder på att kanske 5 - 10 barncancerfall skulle kunna bero på magnetfält. Antalet vuxencancerfall är ca 40000 per år i Sverige. Utgående från Birgitta Floderus studie kan man uppskatta att ca 20 fall vardera av leukemi och hjärntumörer bland yrkesverksamma män, skulle kunna bero på magnetfältsexponering. Gäller överriskerna även andra cancerformer som kvinnlig bröstcancer, kan det röra sig om ett större antal fall. Vi ser att, under förutsättningen att det verkligen finns en överrisk av magnetfältsexponering, så är denna risk liten, jämfört med övriga riskfaktorer som beräknas stå för majoriteten av alla cancerfall. Man beräknar att rökning står för 15 %, dvs. ca 6000 fall årligen och kostfaktorer för dubbelt så många fall.

3.4 Påverkan på nervsystemet

Under 1995 har en finsk-amerikansk studie publicerats, i vilken man ser ett samband mellan demenssjukdomen Alzheimer och elektriska yrken¹⁷. Studien bygger på populationer vid två sjukhus i Helsingfors och en population vid University of Southern California. I alla tre populationerna finner man en överrisk för Alzheimer, för dem som hade medelhög till hög magnetfältsexponering i sitt yrke (riskkvot = 3,0 med ett 95 % konfidensintervall 1,6 - 5,4 när samtliga fall kombineras). Majoriteten av de högexponerade fallen är sömmerskor eller skraddare. Medel-exponeringen för sömmerskor uppmättes till 1,9 μ T, vilket placerar dem i nivå med svetsares medel-exponering.

I en studie av schweizisk järnvägspersonal ser man trender till ökad risk för senil demens och Alzheimers sjukdom för lokförare¹⁸. Det schweiziska järnvägssystemet drivs, liksom i Sverige, med ström av frekvensen 16,7 Hz.

¹⁴ Löscher, W., Wahnschaffe, U., Mevissen, M., Lerchl, A. & Stamm, A. (1994) "Effects of weak alternating magnetic fields on nocturnal melatonin production and mammary carcinogenesis in rats" *Oncology*, **51**: 288-295.

¹⁵ Baum A, Mevissen M, Kamino K, Mohr U & Löscher W. (1995) "A histopathological study on alterations in DMBA-induced mammary carcinogenesis in rats with 50 Hz, 100 mT magnetic field exposure". *Carcinogenesis* 16:119-125.

¹⁶ Anderson LE, Boorman GA, Morris JE, Sasser LB, Mann PC, Grumbein SL, Hailey JR, McNally A, Sills RC & Haseman JK. (1999) Effect of 13-week magnetic field exposures on DMBA-initiated mammary gland carcinomas in female Sprague-Dawley rats. *Carcinogenesis* 20:1615-1620.

¹⁷ Sobel, E., Davanipour, Z., Sulkava, R., Erkinjuntti, T., Wikstrom, J., Henderson, V., Buckwalter, G. Bowman, J. & Lee, P.-J. (1995a) "Occupations with exposure to electromagnetic fields: A possible risk factor for Alzheimer's disease", *Am. J. Epidemiol.*, **142**: 515-524.

¹⁸ Rösli M, Lörtscher M, Egger M, Pfluger D, Schreier N, Lörtscher E, Locher P, Spoerri A, Minder C, (2007) Mortality from Neurodegenerative Disease and Exposure to Extremely Low-Frequency Magnetic Fields: 31 Years of Observations on Swiss Railway Employees *Neuroepidemiology* **28**:197-206.

Yngve Hamnerius AB

I en studie av den Schweiziska befolkningen fann man en signifikant ökad risk att insjukna i Alzheimers sjukdom för personer som bott inom 50 m från stora 50 Hz högspänningsledningar¹⁹.

3.5 Hälsoeffekter av statiska fält

De studier som redovisats i avsnitt 3.2 - 3.4 avser exponering för kraftfrekventa fält. Resultaten i dessa studier har därför relevans endast om man väljer att driva Uppsalas spårvägar med 50 Hz ström. Det finns mycket få studier av exponering för svaga statiska fält. Vi lever i det jordmagnetiska fältet som på jorden varierar mellan 30 - 60 μ T. De DC magnetfält man utsätts för vid spårvägstrafik är i samma storleksordning, varför man inte bör förvänta sig några hälsoeffekter av magnetfältsstyrkan i sig.

Som nämnts tidigare och som visas av mätningarna (avsnitt 2.5.1) varierar DC magnetfältet vid spårvägstrafik, varför det skiljer sig från ett rent statiskt magnetfält. Innebär det några hälsoeffekter av dessa varierande magnetfält, att bo nära en spårvägslinje? Sannolikt inte, vi har inga som helst belägg för att så skulle vara fallet, men så vitt jag vet finns det inga studier av detta publicerade. Man kan ju förutsätta att allvarliga hälsoeffekter borde upptäckts, då vi har cirka hundra års erfarenheter av elektrisk spårvägstrafik. Man kan dock aldrig bevisa att något är ofarligt.



Spårvagn i franska Strasbourg.

¹⁹ Huss A, Spoerri A, Egger M, Rösli M, (2009) Residence Near Power Lines and Mortality From Neurodegenerative Diseases: Longitudinal Study of the Swiss Population American Journal of Epidemiology 169, Pp. 167-175.

3.6 Riktvärden och rekommendationer för hälsoeffekter av lågfrekventa fält

Det finns svenska gränsvärden som begränsar lågfrekventa magnetfält på arbetsplatser. När det gäller allmänhetens exponering finns det försiktighetsprinciper och rekommendationer. Det finns klara bevis för att starka fält kan ge hälsoeffekter, men även misstankar att långvarig exponering för kraftfrekventa fält innebär en ökad risk för barnleukemi.

Strålsäkerhetsmyndigheten, SSM, har givit ut "allmänna råd"²⁰ för allmänhetens exponering för elektromagnetiska fält, som bygger på Europarådets rekommendation från den 12 juli 1999, om allmänhetens exponering för fält med frekvenser mellan 0 och 300 GHz.

Europarådets rekommendation har tagits fram av ett antal aktörer, såsom ICNIRP (The International Committee of Non Ionizing Radiation Protection), SCC (The Scientific Steering Committee) och Europeiska Kommissionen. Denna rekommendation utgår från ICNIRP's²¹ 1998 publicerade guideline.

ICNIRP:s riktlinjer bygger på två allmänt accepterade hälsoeffekter.

- 1) Lågfrekventa fält kan inducera ström, som om den är tillräckligt stark, kan excitera nervsignaler.
- 2) Högfrekventa fält kan alstra en skadlig uppvärmning av vävnader i kroppen.

Utgående från dessa akuta hälsoeffekter, har ICNIRP satt upp grundläggande begränsningar som, för arbetsexponering ligger 10 gånger under den nivå, där effekten dokumenterats. För allmänhetens exponering har man lagt till en säkerhetsfaktor på ytterligare 5 gånger, för att täcka in variationer i känslighet för barn, gamla och sjuka. De grundläggande begränsningarna säkerställer att elektriska och magnetiska fenomen som kan uppträda i kroppen, inte stör funktioner i nervsystemet eller ger upphov till skadlig värmeutveckling.

För kraftfrekventa fält innebär de grundläggande begränsningarna, att den inducerade strömtätheten i centrala nervsystemet, medelvärdesbildad över 1 cm², är mindre än 2 mA/m² för allmänhetens exponering. Då dessa grundläggande begränsningar är svåra att mäta, i en praktisk situation, har ICNIRP infört något man kallar referensvärden. Referensvärdena anges i storheter som kan mätas utanför kroppen och är härledda ur de grundläggande begränsningarna och säkerställer att dessa inte överskrids. Om referensvärdet överskrids innebär det inte nödvändigtvis att de grundläggande begränsningarna överskrids. Om ett referensvärde överskrids ska man istället göra en grundligare utredning för att undersöka om de grundläggande begränsningarna överskrids eller ej. Referensvärden varierar med frekvensen, för 50 Hz är referensvärdet för magnetiska fält 100 µT för allmänhetens exponering.

Då spårvägen huvudsakligen alstrar statiska fält är det referensvärdena för dessa som är aktuella. Upp till 1 Hz är referensvärdet för magnetiska fält 40 000 µT för

²⁰ Strålsäkerhetsmyndighetens allmänna råd om begränsning av allmänhetens exponering för elektromagnetiska fält; beslutade den 19 december 2008, SSMFS 2008:18.

²¹ ICNIRP "Guidelines on limits of exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)", International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, Health Physics, April 1998, Volume 74, 494-522.

Yngve Hamnerius AB

allmänhetens exponering. För elektriska fält anges inget referensvärde under 1 Hz, för 1 Hz till 8 Hz är referensvärdet 10 000 V/m för allmänhetens exponering.

ICNIRP uppdaterade rekommendationerna för elektriska och magnetiska fält i frekvensområdet 1 Hz – 100 kHz år 2010²². I de nya rekommendationerna bygger den grundläggande begränsningen på den inducerade elektriska fältstyrkan i kroppen, istället för den inducerade strömtätheten. Detta får till följd att vissa referensvärden ändras. Dessa ändringar innebär att referensvärdena i vissa fall är högre än i 1998 års utgåva. Då varken EU eller SSM har ändrat sina rekommendationer, bygger jag den fortsatta skrivningen på de tidigare (strängare) ICNIRP rekommendationen.

EU beslutade 2004 om ett direktiv för att begränsa exponering för elektromagnetiska fält i arbetslivet, vilket innebär tvingande gränsvärden²³. Direktivet skulle trätt i kraft år 2008 i alla EU:s medlemsstater, men direktivet omarbetades och ikraftträdandet uppsköts till 2016. Gränsvärdena finns i EU's direktiv 2013/35/EU²⁴ (EMF-direktivet).

Direktivet anger två typer av gränsvärden, dels gränsvärden för exponering (ELV), dels insatsvärden (AL). ELV avser den inducerade fältstyrkan inne i kroppen och är det egentliga gränsvärdet som inte får överskridas. Inducerad fältstyrka i kroppen kan inte mätas utan endast indirekt beräknas via datorsimuleringar. Det är därför svårt att tillämpa ELV. Insatsvärdena, AL, avser det yttre magnetfältet som går att mäta direkt med lämpliga instrument. Principen är att om AL inte överskrids, överskrids inte heller ELV.

Det är tillåtet att överskrida AL om man kan visa att ELV inte överskrids.

Direktivet liksom SSM:s rekommendationer och ICNIRPs guidelines bygger på bevisade hälsoeffekter. Forskningen på området visar att det finns biologiska effekter även under dessa föreslagna nivåer. Den intressanta frågan är då om dessa biologiska effekter kan innebära negativa hälsoeffekter. Den mest omfattande forskningen har studerat frågan om lågfrekventa fält kan ge upphov till cancer.

WHO:s cancerforskningsorgan IARC (2002) har behandlat denna fråga. IARC klassificerar cancerrisker i fyra nivåer:

Grupp 1: ämnen som vetenskapen **med säkerhet** vet är cancerframkallande, till exempel asbest, radon och tobak.

Grupp 2A: ämnen och faktorer som **troligtvis** är cancerframkallande, till exempel formaldehyd, dieselavgaser och solarieanvändande.

Grupp 2B: **möjlig** cancerframkallande agens som DDT, bly, diesel, bensin, svetsrök och lågfrekventa magnetiska fält.

²² ICNIRP ”Statement - Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz)”, International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, Health Physics, December 2010, Volume 99, 818-836.

²³ Europaparlamentets och rådets direktiv 2004/40/EG om minimikrav för arbetstagares hälsa och säkerhet vid exponering för risker som har samband med fysikaliska agens (elektromagnetiska fält) i arbetet.

²⁴ Directive 2013/35/EU of the European Parliament and of the Council of 26 June 2013 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (electromagnetic fields) (20th individual Directive within the meaning of Article 16(1) of Directive 89/391/EEC) and repealing Directive 2004/40/EC

Yngve Hamnerius AB

Grupp 3: ämnen eller agens där det **inte finns tillräckligt underlag** för bedömning; exempelvis lysrörsbelysning, koffein och kvicksilver.

Grupp 4: ämnen som **troligtvis inte** är cancerframkallande.

IARC's bedömning när det gäller **statiska** elektriska och magnetiska fält samt lågfrekventa **elektriska** fält är att nuvarande data inte räcker för att man skall kunna bedöma om de är cancerframkallande eller inte (grupp 3).

För **lågfrekventa magnetfält** görs bedömning att de **möjligen** skulle kunna vara cancerframkallande, grupp 2B. Expertgruppen gjorde bedömningen att barncancerstudierna utgjorde ett begränsat bevis (limited evidence) för en överrisk för cancer, medan bedömningen av studier på vuxna blev att bevisningen var ofullständig (inadequate evidence). IARC ställningstagande bygger framförallt på epidemiologiska studier av barncancer och magnetfältsexponering. Man skriver i pressmeddelande då man presenterade klassningen:

"En kombinerad (pooled) analys av data från ett antal väl utförda studier visar ett ganska konsistent statistiskt samband mellan barnleukemi och exponering i hemmet för kraftfrekventa magnetiska fält med fältstyrkor över 0,4 μ T, med en ungefär fördubblad risk. Det är osannolikt att detta beror på slumpen, men resultatet skulle kunna ha påverkats av selektionsbias".

I WHO: s Environmental Health Criteria²⁵, 2007, har en förnyad bedömning av IARC:s klassificering gjorts. Utfallet av WHO:s bedömning är densamma som IARC:s, även mot bakgrund av studier som publicerats sedan 2002.

Redan år 1996 beslutade Arbetsmiljöverket, Socialstyrelsen, Statens strålskyddsinstitut, Elsäkerhetsverket och Boverket att en försiktighetsprincip ska gälla för lågfrekventa elektriska och magnetiska fält²⁶.

I försiktighetsprincipen nämns ingen explicit magnetfältsnivå. Man skriver "Myndigheterna rekommenderar gemensamt följande försiktighetsprincip: **Om åtgärder, som generellt minskar exponeringen, kan vidtas till rimliga kostnader och konsekvenser i övrigt bör man sträva efter att reducera fält som avviker starkt från vad som kan anses normalt i den aktuella miljön. När det gäller nya elanläggningar och byggnader bör man redan vid planeringen sträva efter att utforma och placera dessa så att exponeringen begränsas.** Det övergripande syftet med försiktighetsprincipen är att på sikt reducera exponeringen för magnetfält i vår omgivning för att minska risken att människor eventuellt kan skadas."

Socialstyrelsen gav i samverkan med Statens strålskyddsinstitut, Elsäkerhetsverket och Boverket ut en uppdatering till försiktighetsprincipen 2005²⁷. I denna sägs:

"Sambandet mellan exponering för elektromagnetiska fält från kraftledningar och vissa andra elinstallationer och ökad risk för leukemi hos barn har diskuterats under många år.

²⁵ WHO: *Extremely Low Frequency Fields* Environmental Health Criteria Monograph No.238, 2007.

²⁶ Arbetsmiljöverket, Boverket, Elsäkerhetsverket, Socialstyrelsen och Statens strålskyddsinstitut "Myndigheternas försiktighetsprincip om lågfrekventa elektriska och magnetiska fält - en vägledning för beslutsfattare" 1996.

²⁷ Socialstyrelsen, Elektromagnetiska fält från kraftledningar, Meddelandeblad juni 2005.

Yngve Hamnerius AB

Under 2001²⁸ gjordes en omfattande genomgång av de epidemiologiska²⁹ forskningsrapporter som då fanns. Resultaten från genomgången tyder på att man kan se en viss ökning av leukemirisken hos befolkningsgrupper som exponeras för magnetiska fält på 0,4 μ T eller mer (avser långvarig exponering för 50 Hz magnetfält i bostäder). Däremot ser man ingen riskökning under 0,4 μ T. Det finns inte någon känd mekanism som skulle kunna förklara hur exponering för så svaga och lågfrekventa fält skulle kunna påverka risken för sjukdom.

Det vetenskapliga underlaget anses fortfarande inte tillräckligt gediget för att man ska kunna sätta ett gränsvärde. Det beror bland annat på att det saknas en biologisk förklaringsmodell för påverkan på cancerrisken.

Ellagstiftningen liksom miljöbalkens regler om försiktighet är tillämpliga på den här typen av exponeringar. De innebär att risker för människors hälsa ska undvikas så långt som det kan anses ekonomiskt rimligt”.

Som framgår av ovanstående gäller försiktighetsprincipen kraftfrekventa fält, för de i huvudsak statiska fält som orsakas av likströmsdriven spårvägstrafik begränsas den akuta exponeringen av SSM:s allmänna råd. Långsiktiga effekter av statiska fält har inte påvisats, men ej heller studerats i någon betydande omfattning.

3.7 Bedömning av fälten från spårvägstrafik

Anläggandet av ny spårväg kommer att innebära att huvudsakligen elektriska och magnetiska DC-fält alstras kring spårvägen, om den drivs med likström. Spårvägens driftspänning är 750 V, vilket ger en elektrisk fältstyrka vid gatunivå som är klart under den naturliga elektriska fältstyrkan som typiskt är 100 V/m. SSM:s allmänna råd anger inget referensvärde under 1 Hz, men i intervallet 1 Hz – 8 Hz är referensvärdet för allmänheten 10 000 V/m vilket spårvägen klarar med god marginal.

Det är rimligt att anta att de magnetiska fälten från en konventionell spårväg motsvarar de nivåer som redovisades i avsnitt 2.5.1 för de mätningar som utförts vid Aschebergsgatan i Göteborg, 5 meter från spårmittpunkt. Det skulle innebära en ändring av DC-magnetfältet på ca 30 μ T vid spårvagnspassage. Denna styrka på DC-magnetfältet är av samma storleksordning som det jordmagnetiska fältet. SSM:s allmänna råd anger referensvärdet 40 000 μ T för frekvenser under 1 Hz, för allmänheten, vilket spårvägen klarar med god marginal.

Vi ser att vid likströmsdrift klaras SSM:s rekommendationer som skall skydda mot akuta hälsorisker med god marginal. Då det inte finns några studier som visar på långsiktiga hälsoeffekter av de (varierande) DC magnetfält som alstras av spårvägen, så känner vi inte till några hälsoeffekter av de fält som alstras av en likströmsdriven spårväg.

²⁸ Ahlbom et al: Review of the Epidemiologic Literature on EMF and Health, Environmental Health Perspectives, Volume 109, Supplement 6, December 2001.

²⁹ ”Epidemiologisk forskning undersöker förekomsten av olika sjukdomar i en population, eller studerar om det finns samband mellan en viss exponering och någon sjukdom eller tillstånd. Gemensamt för epidemiologins olika användningsområden är en teoretisk och metodologisk grund. Den omfattar verktyg för att definiera frågeställningar, designa studier, samt tolka resultat från studier. En förutsättning för en högkvalitativ epidemiologisk forskning är att den baseras på statistiska analysmetoder anpassade för epidemiologiska data. Ovanpå detta krävs kunskap som är speciellt inriktad mot det aktuella forskningsområdet” (Socialstyrelsens fotnot).

Yngve Hamnerius AB

De problem som fälten från en likströmsdriven spårväg ger upphov till är störningar av känslig teknisk apparatur. Som framgår av avsnitt 5 kan störkänsligheten för viss apparatur vara mycket stor.

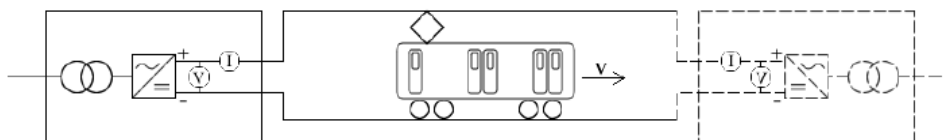
4 Principer för uppbyggnad av spårväg

I detta avsnitt beskrivs hur elförsörjningen kan göras för konventionell spårväg och för en spårväg med laddteknik.

4.1 Uppbyggnad av konventionell spårväg

En konventionell spårväg har spårvagnar som matas via kontaktledning, återgångsströmmen går i rälsen. Det klart vanligaste när det gäller spårvagnar är likströmsdrift. Det finns 4 likspänningsnivåer som är standardiserade i IEC 60850³⁰ och det är dessa som används i de flesta spårvägs- och tunnelbanesystem, nivåerna är 600 V, 750 V, 1500 V och 3000 V. För spårväg används vanligen de två lägre spänningsnivåerna.

För att strömförsörja spårvägen placerar man ut ett antal likriktarstationer längs med spårvagnslinjerna, se figur 4.1. Avståndet mellan likriktarstationerna bestäms av hur mycket trafik som går på respektive sektion. För Göteborgs spårvägar är ligger avstånden mellan likriktarstationerna typiskt på 1 – 2 km, i centrum, där det är mycket trafik, finns sektioner som bara är 0,5 km långa. Likriktarstationerna matas med 50 Hz högspänning på vanligen spänningsnivån 10-20 kV³¹.



Figur 4.1 Spårvagnarna matas från likriktarstationer, varje sektion kan vara matad från en eller två (som i bilden) likriktarstationer, från J Edstrand 2012³².

I avsnitt 6 behandlas varianter på kontaktledningssystem där man reducerar längden på den strömförande sträckan för att reducera magnetfältet.

4.2 Uppbyggnad av spårväg med laddteknik

För spårväg med batteridrift varierar uppbyggnaden beroende på vilken kapacitet batterierna har. Har man batterier med kapacitet för en hel dags trafik kan det räcka med att ladda batterierna där spårvagnarna ställs upp för natten. Hög batterikapacitet innebär högre vikt och en betydande kostnad. Man kan därför tänka sig tätare laddningar, t.ex. vid ändstationerna. De elbussar som går mellan Johanneberg och Lindholmen i Göteborg laddas vid ändhållplatserna. En nackdel är att vagnen måste vänta under laddningen, vilket leder till sämre kapacitet och högre personalkostnad.

Ett sätt att undvika dessa väntetider är att kombinera batteridrift med kontaktledning för de sträckor där det inte finns storkänslig utrustning i närliggande hus.

³⁰ IEC Standard 60850, Railway applications - supply voltages of traction systems," 2007.

³¹ IEC Standard 60038, IEC Standard Voltages," 2009.

³² J Edstrand Calculation method for powering a tramway network. Master of science thesis in electrical power engineering, Chalmers University of Technology, 2012.

Yngve Hamnerius AB

På kontaktledningssträckan drivs spårvagnen på konventionellt sätt samtidigt som man laddar batterierna. Om man vill undvika strömavtagare och kontaktledning finns möjligheten att använda induktiv teknik för trådlös laddning, se avsnitt 6.2.3.

Om man använder bränsleceller, istället för batterier, så tankar man vätgas som i bränslecellen alstrar elström som driver spårvagnen. Gastankarna för vätgas kan utan någon stor extrakostnad göras så stora att man bara behöver tanka en gång per dygn. I detta fall behövs ingen strömförsörjning för spårvagnarnas drift.

5 Elektromagnetiska fält kring spårväg

Området där spårvägen kommer att dras har för närvarande ingen spårvagnstrafik, varför det inte finns några magnetfält från spårvagnstrafik. Däremot finns det magnetfält från andra källor.

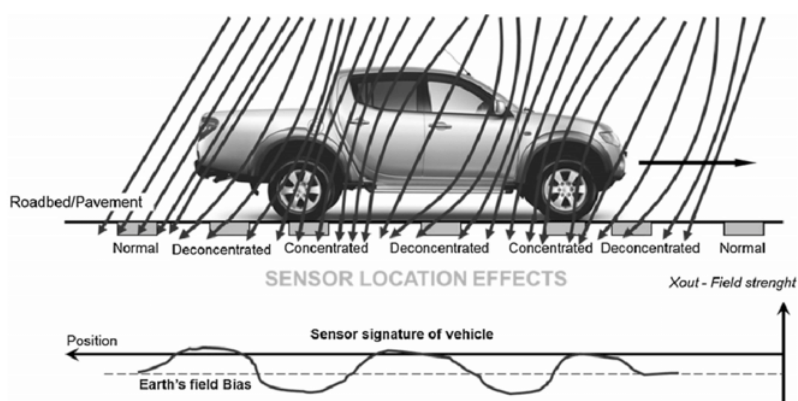
Man kan dela upp spårvagnens magnetfältsbidrag i olika delar:

1. Störning av jordmagnetiska fältet på grund av järn i spårvagnen
2. Störning av framdrivningssystemet i vagnen
3. Störning på grund av strömmatning till vagnen

Fordon med laddteknik kan ge upphov de två förstnämnda störningarna medan konventionella spårvagnar med kontaktledning kan ge alla tre typerna av störning.

5.1 Störning av jordmagnetiska fältet på grund av stål i spårvagnen

När ett järnföremål förs in i det jordmagnetiska fältet kommer det att störa det jordmagnetiska fältet. Det magnetiska flödet går hellre i stål än i luft varför magnetfältet kommer att attraheras av spårvagnens ståldelar och koncentreras där. Detta gäller alla typer av fordon som innehåller järn såsom bilar, bussar spårvagnar och tåg. Det ostörda jordmagnetiska fältet kan åskådliggöras som parallella raka fältlinjer som faller in snett mot jordytan. I figur 5.1 illustreras hur fältlinjerna störs av en bil.



Figur 5.1 Bilden illustrerar hur det jordmagnetiska fältet störs av en bil, från Bottero m.fl. 2012³³.

En uppfattning av hur stor denna störning är kan fås från en mätning vi utförde i ett rum där det gick en busslinje utanför rummet. Det statistiska magnetfältet mät-

³³ M. Bottero, B. Dalla Chiara, F.P. Deflorio Wireless sensor networks for traffic monitoring in a logistic centre. Transportation Research Part C 26 (2013) 99-124.

Yngve Hamnerius AB

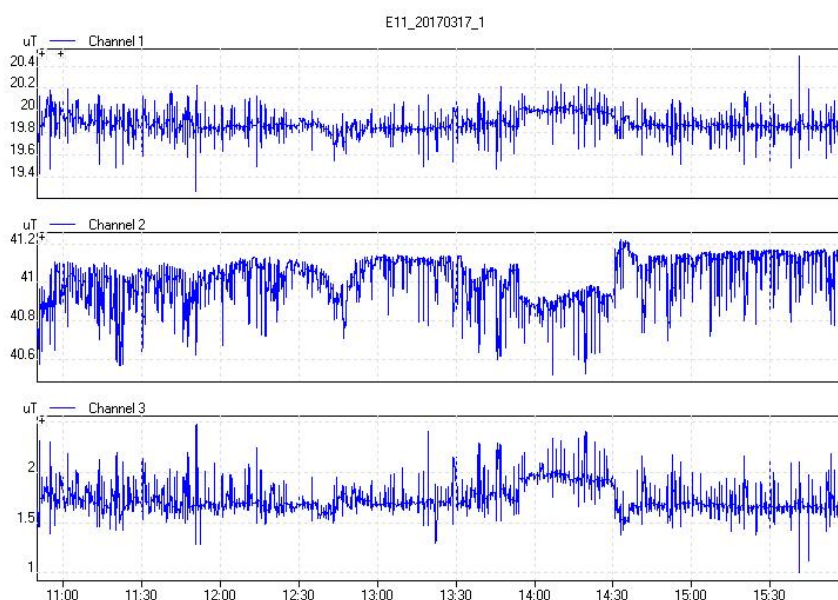
tes under ett dygn med en tre-axlig "fluxgatesond", MAG-03 tillsammans med en Pico ADC-20 datalogger. Instrumenten mätte det statiska magnetfältet 3 gånger per sekund och lagrade värden för de tre axlarna i en bärbar dator. Jordens statiska magnetfält är i Sverige ca 50 μT och vi är intresserade av det statiska fältets variation i tiden. Instrumenten kan mäta upp till $\pm 100 \mu\text{T}$ med en upplösning på 1 nT. Det statiska magnetfältet påverkas av föremål av järn och stål vilket leder till att bakgrundsnivån i många fall skiljer sig i både styrka och riktning från det naturliga bakgrundsvärdet på ca 50 μT . Värt att nämna är att det också finns en naturlig variation (normalt 10-tals nT, vid så kallade magnetiska stormar avsevärt mer) av jordens statiska fält.

Magnetfältsonden var placerad i rummet på ett avstånd av ca 5 m från gatukanten där bil och busstrafik gick. Uppmätta variationer i det jordmagnetiska fältet sammanfattas i tabell 5.1.

Tabell 5.1 Sammanfattning av variationerna i statistiskt magnetfält i en mätpunkt ca 5 m från trafikerad gata.

Riktning	Medelvärde (μT)	Minvärde (μT)	Maxvärde (μT)
x (ch1)	20,025	19,273	20,887
y (ch2)	41,162	40,522	41,433
z (ch3)	1,650	0,639	2,492
Vektorsumma	45,804	45,011	46,082

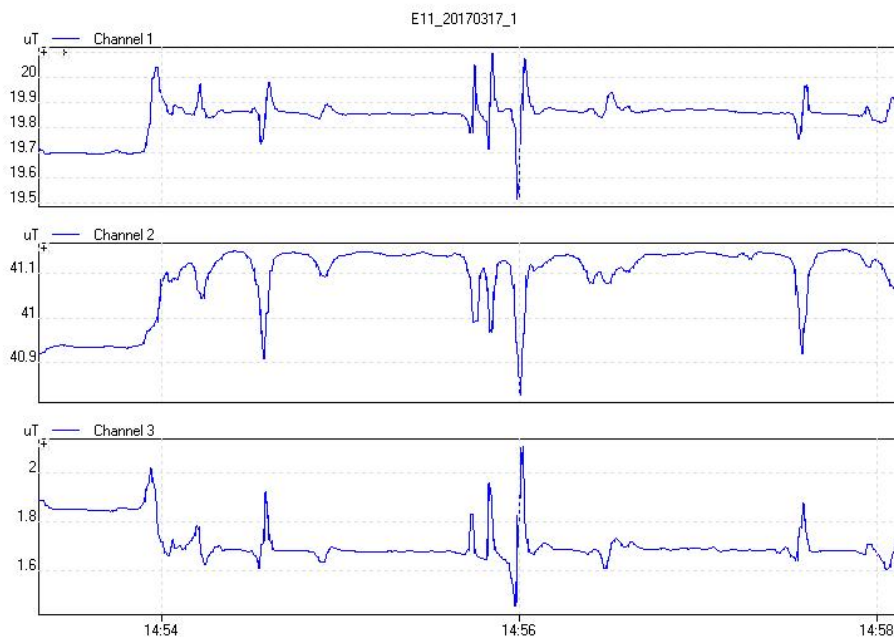
Tidsvariationen i X- Y- och Z-led (Channel 1-3) redovisas i figur 5.2 – figur 5.4. Variationerna beror på den täta trafik av bilar och bussar som passerar strax utanför byggnaden.



Figur 5.2 Mätning av statiskt magnetfält i X-, Y- och Z-riktningen, en fredag mellan kl. 11 till kl. 16.

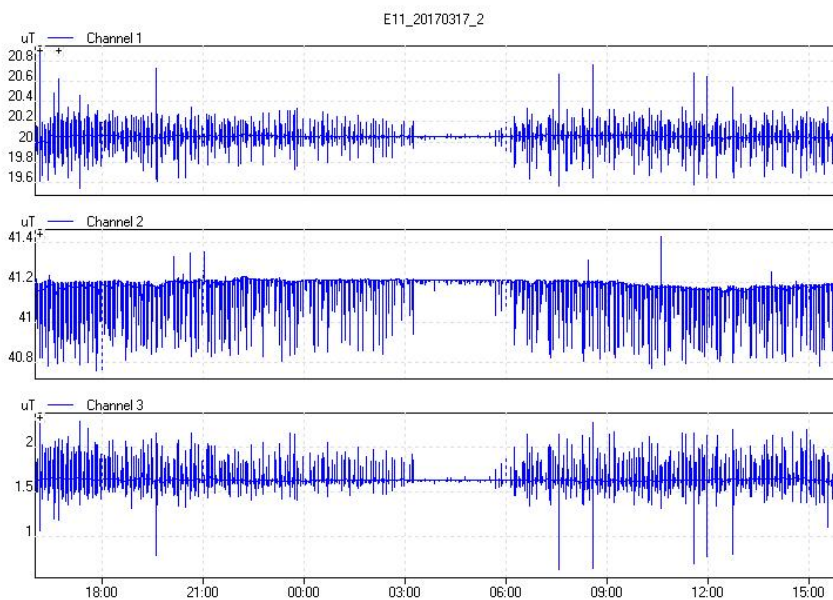
Yngve Hamnerius AB

Om vi expanderar ett tidsutsnitt kan vi detaljstudera en busspassage som skedde kl. 14:56, se figur 5.3. Vi ser en variation i det jordmagnetiska fältet i både x, y och z-led med en amplitud på storleksordningen $0,5 \mu\text{T}$.



Figur 5.3 Detalj ur figur 5.2, statiskt magnetfält vid busspassage kl. 14:56.

I figur 5.4 visas hela mätningen som sträcker sig över ett knappt dygn. Mellan kl. 03 till 06 finns endast mycket små magnetfältsvariationer vilket tyder på att ingen trafik passerar under dessa nattimmar.



Figur 5.4 Mätning av statiskt magnetfält i X-, Y- och Z-riktningen, från fredag kl. 16 till lördag kl. 15.

Yngve Hamnerius AB

Magnetfältet från ström i kontaktledningen kan relativt enkelt beräknas, se avsnitt 5.3. Att beräkna den **störning av det jordmagnetiska fältet** som stålet i spårvagnen ger upphov till är ett betydligt svårare problem. Det jordmagnetiska fältet faller in mot jorden med en inklinations på ca 71° i Sverige. Inklinationen är vinkeln mellan magnetfältet och ett horisontalplan. När en spårvagn förs in i magnetfältet kommer fältlinjerna att ansamlas för att gå igenom spårvagnens stålkaross. Det innebär att det blir "färre" fältlinjer runtomkring spårvagnen, varför det jordmagnetiska fältet ändras kring spårvagnen. Vi är intresserade av hur långt denna störning går och med vilken styrka. För att lösa detta behöver vi veta hur stålet fördelar sig i spårvagnen och sedan göra en avancerad numerisk beräkning. Ett omfattande arbete som skulle ta några veckors arbetstid.

Nu vet vi inte vilka spårvagnsmodeller som kommer att användas i Uppsala och tidplanen för denna rapport tillåter inte ett sådant arbete. För några enkla geometrier som sfär och en cylindriskt rör finns det analytiska lösningar. Sådana modeller kan ge en värdefull ungefärlig lösning till problemet.

För att erhålla rimliga dimensioner och massa har vi utgått från den senast i trafik tagna spårvagnen modell M32 hos Göteborgs Spårvägar³⁴. En enkel och informativ modell för en spårvagn i det jordmagnetiska fältet kan konstrueras genom att analysera ett ihåligt (och luftfyllt) rör tillverkat av ett magnetiskt material, där rörets innerradie betecknas r_i och dess ytterradie r_y . En spårvagns vikt består huvudsakligen av stålet i spårvagnen. För en spårvagn med massan $m = 40500$ kg kan stålets volym uppskattas till ungefär $v = m/d = 5.2$ m³, där $d = 7859$ kg/m³ är densiteten för stål. Hela vikten på spårvagnen är naturligtvis inte stål, men vi gör en konservativ ansats och sätter hela massan till stål.

I det som följer sätts rörets tvärsnittsarea (baserat på dess ytterradie r_y) lika med spårvagnens tvärsnittsarea bh , där spårvagnens bredd är $b = 2.6$ m och dess höjd är $h = 3.3$ m. Vidare sätts rörets godstjocklek $r_y - r_i$ så att rörets volym blir lika med stålets volym v , då röret är lika långt som en spårvagn med längden $l = 29.5$ m. Sammantaget ger detta att rörets ytterradie är $r_y = 1.65$ m och dess godstjocklek är $r_y - r_i = 1.7$ cm, vilket baseras på de siffervärden som anges ovan. Den verkliga plåttjockleken är mindre i överbyggnaden medan underredet innehåller mer stål så rörtjockleken motsvarar ett medelvärde.

Då röret placeras i ett yttre konstant magnetfält (som faller in vinkelrätt mot rörets axel) kan störningen i det yttre magnetiska fältet beräknas med variabelseparation³⁵. Med de siffervärden som anges ovan i kombination med den (ungefärliga) relativa permeabiliteten 100 för stål så erhålls nedanstående avstånd (från rörets mittaxel) för respektive störningsnivå, tabell 5.2. Störnivån har erhållits genom att beräkna det vektoriella magnetfältet med störning och subtrahera det ostörda jordmagnetiska fältet och sedan ta absolutbeloppet av skillnadsvektorn.

³⁴ https://www.sparvagssallskapet.se/vagnhallen/typ.php?typ_id=503

³⁵ K.J. Binns, P.J. Lawrenson, C.W. Trowbridge, "The Analytical and Numerical Solution of Electric and Magnetic Fields," New York, NY: John Wiley & Sons, 1992.

Yngve Hamnerius AB

Tabell 5.2 Beräknad störning av jordmagnetiska fältet på olika avstånd från centrum av ett oändligt långt stålrör.

Störningsnivå [uT]	Avstånd [m]
0.1	21.9
0.2	15.5
0.5	9.8
1	6.9
2	4.9
5	3.1

Störningen i det jordmagnetiska fältet är proportionell mot $1/r^2$ där r är avståndet till rörets mittaxel. För att kunna lösa problemet med så kallad variabelseparation måste man anta att röret är oändligt långt, och därmed så är avståndsuppskattningarna ovan större än om röret hade haft en ändlig längd så som en spårvagn. Avståndsuppskattningen i tabell 5.2 ovan är tämligen god då den är mindre än 10 m (dvs betydligt mindre än spårvagnens längd $l = 29.5$ m).

Som jämförelse kan allt stål i spårvagnen samlas i ett klot med radie 1.1 m och för detta problem kan man också beräkna (det maximala) avståndet till de olika störningsnivåerna med hjälp av variabelseparation. I jämförelse med tabellen ovan så minskar avståndet (från klotets mittpunkt till de olika störningsnivåerna) till 10.8 m, 8.6 m, 6.3 m, 5.0 m, 4.0 m respektive 2.9 m. Störningen i det jordmagnetiska fältet för klotet är proportionell mot $1/R^3$ där R är avståndet till klotets mittpunkt. Detta avståndsavtagande gäller när man är på långt håll från spårvagnen (några spårvagnslängder).

5.2 Störning av framdrivningssystemet i vagnen

Detta avsnitt behandlar de elektromagnetiska fält som beror matningen av elmotorerna som driver spårvagnen och motorerna och elektronikens egna bidrag. Dessa bidrag beror på hur spårvagnen har konstruerats.

För **fordon med laddteknik** bör det vara möjligt att konstruera ett framdrivningssystem som ger låga fältbidrag. Det är viktigt att strömmatningen från strömkällan (batterier/supercapacitorer/bränsleceller) görs med tätt sammanhållna matningsledare och att motorer och eventuella strömriktare gör i skärmat utförande.

Bakgrunden till detta uttalande är de mätningar vi utfört på batteridrivna bussar för Volvo Bus. Det magnetiska fältet mättes inne i bussen på förar- och passagerarplatser i frekvensområdet 10 Hz - 400 kHz. Typiska nivåer låg på 0,1 - 0,5 μ T inne i bussen. De dominerande frekvenserna var omkring 1, 3, 9 and 27 kHz. Vad som inte mättes vid detta tillfälle var de statiska magnetfälten. Om vi får tillfälle

Yngve Hamnerius AB

att mäta på fler batteribussar kan vi komplettera med de statiska magnetfälten eller ändå hellre utföra mätningar på batteridrivna spårvagnar som finns i drift på flera ställen i Europa.

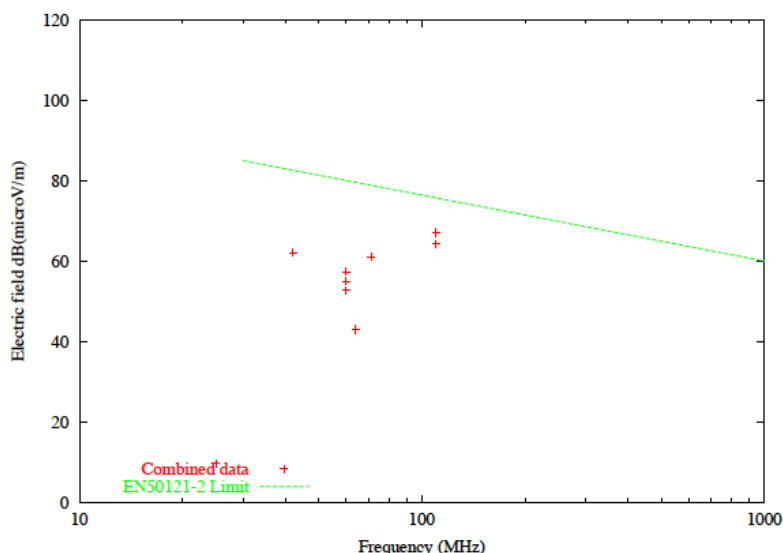
Viktigt att notera är att Volvo hade konstruerat dessa bussar med tanke på låga magnetfält med en kompakt och skärmad konstruktion. Om man inte har med magnetfälten som en designfaktor kan naturligtvis resultatet bli mycket sämre.

Även för **konventionella spårvagnar** är det också värdefullt att konstruera drivsystemet för låga fält. Med konventionell matning med strömavtagare mot kontaktledning kommer driftströmmen att ingå i slingan kontaktledning, genom spårvagnen och åter i rälsen, varför magnetfälten inte kan bli så låga som för fordon med laddteknik. Fälten från denna slinga behandlas i avsnitt 5.3.

5.3 Störning på grund av strömmatning till vagnen

Konventionell spårvägstrafik ger upphov till elektriska och magnetiska fält i spårvägens omgivning. Vid likströmsdrift alstras DC elektriska och magnetiska fält. Det elektriska fältet är i stort sett konstant i tiden då matningsspänningen (750 V) ligger på kontaktledningen oavsett om det går några vagnar eller ej. Strömstyrkan är däremot inte konstant varför det uppstår variationer i magnetfältets styrka.

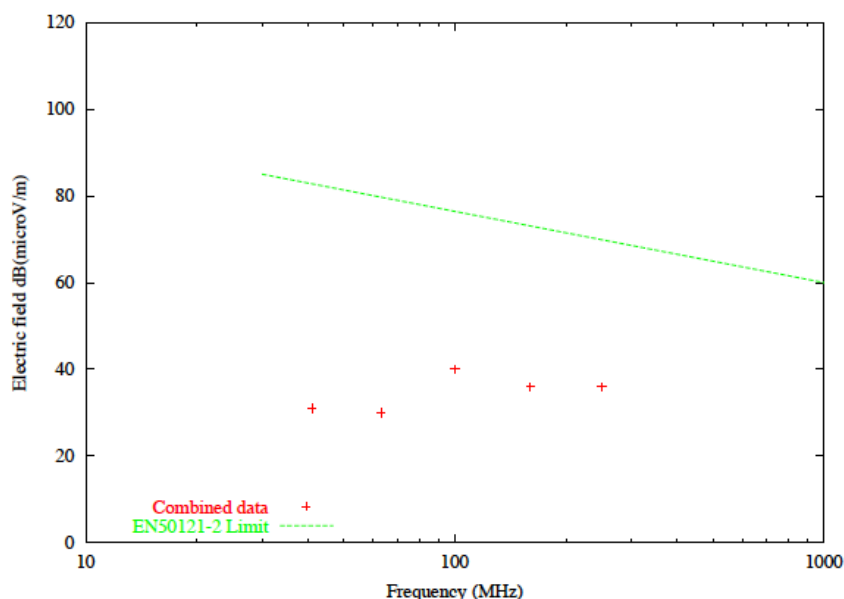
De alstrade DC elektriska fälten innebär sällan något problem. Elektriska fältstyrkor av samma storleksordning existerar naturligt i luft beroende på väderfenomen. Vid dålig kontakt mellan strömavtagare och kontaktledning uppstår gnisturladdningar. Dessa kan orsaka ljusfenomen och radiostörningar. EMC York har sammanställt data för störningar från tåg³⁶. I denna rapport finns det publicerade mätningar från spårvägsdrift med 750 V DC, dels med kontaktskena, figur 5.5, dels med kontaktledning, figur 5.6.



Figur 5.5. Uppmätta radiofrekventa fält (röda plustecken) 10 m från 750 V DC tåg som matas med kontaktskena. I bilden har EU:s EMC-krav lagts in med grön linje.

36 T Konefal , D A J Pearce, C A Marshman, L M McCormack Potential Electromagnetic Interference to Radio Services From Railways EMC York Final Report (AY4110) For Radiocommunications Agency, u. å.

Yngve Hamnerius AB



Figur 5.6. Uppmätta radiofrekventa fält (röda plustecken) 10 m från 750 V DC tåg som matas med kontaktledning. I bilden har EU:s EMC-krav lagts in med grön linje.

Som framgår av figurerna 5.5 och 5.6 ligger de uppmätta värdena för radiofrekventa fält från spårvagnstrafik med 750 V DC under EU:s EMC krav. EMC betyder ElectroMagnetic Compatibility eller på svenska elektromagnetisk förenlighet och innebär att olika tekniska system kan fungera utan att störa varandra. Dessa krav är dock inte satta så att de eliminerar alla radiostörningar. I rapporten från EMC York har man beräknat vid vilket avstånd som krävs för att undvika radiostörningar, från en 750 V DC-matad spårväg, som ger störningsnivåer som är lika starka som EU:s EMC gränsvärde, se tabell 5.2.

Tabell 5.2 Beräknat säkerhetsavstånd från 750 V DC spårväg, som alstrar störningsnivåer vid EU:s EMC gränsvärde (EN50121 limits), för långvåg (LW), mellanvåg (MW) och kortvågs (SW) AM-mottagning, från Konefal et al.³⁷

<i>Service</i>	<i>Interference Tolerable</i>	<i>EN50121 Limits</i>	<i>Protection Distance Required</i>
LW Broadcasting	40 dB μ V/m	57.3 dB μ A/m (200 kHz)	820 m
MW Broadcasting	40 dB μ V/m	42.1 dB μ A/m (1 MHz)	420 m
SW Broadcasting	40 dB μ V/m	20.4 dB μ A/m (10 MHz)	210 m

Som framgår av tabellen är det de låga frekvenserna (LW) som störs mest. De beräknade säkerhetsavstånden är beräknade för värsta fall, störnivå vid gränsvärdet och samma polarisation på störningen och mottagaren. Det elektriska fältet från spårvägen är, enligt Konefal et al., huvudsakligen horisontalpolarisering.

³⁷ T Konefal, D A J Pearce, C A Marshman, L M McCormack Potential Electromagnetic Interference to Radio Services From Railways EMC York Final Report (AY4110) For Radiocommunications Agency u. å.

Yngve Hamnerius AB

rat. Ett horisontalpolariserat elektriskt fält kommer att dämpas av markens resistivitet, när vågen utbreder sig. Radiosändningar är därför normal vertikalt polariserade för att minimera dämpningen. Detta innebär att radiostöravståndet blir kortare än de angivna avstånden i tabell 5.2.

Störst risk för gnistbildning och radiostörningar uppstår där strömtillförseln avbryts. Om man använder sig av strömmatning via en tredje räl måste man ha avbrott där två spår korsar varandra, varför detta blir punkter med större risk för radiostörningar. Liknande problem kan uppstå om man har ett blandat system där man övergår från kontaktledning till rälmattning.

Det är inte endast radiostörningar som kan vara ett problem vid spårvägsdrift. Det lågfrekventa magnetfält som uppstår vid 50 Hz-matningen eller variationerna i magnetfältets styrka vid DC matning innebär störningar av teknisk apparatur med fria elektronstrålar, som elektronmikroskop, elektronstrålelitografer men även katodstrålerör som används i äldre teveapparater och bildskärmar. Apparatur som använder sig av magnetfält för avbildning, såsom magnetresonanskameror kan störas. Elektronmikroskop och elektronstrålelitografer är speciell apparatur som används inom sjukvård, forskning och industri.

Med tanke på att det är ett antal år tills spårvägen tas i drift kommer bildrör till stor andel ha ersatts av platta bildskärmar och teveapparater vilka inte störs av magnetfältsvariationer.

Före en ny spårväg anläggs bör en inventering av potentiella störoffor göras. Vid projekteringen av den så kallade Kringentunneln i Göteborg gjordes en sådan inventering, då den nya spårvägen kom att gå nära störningskänsliga miljöer, vid Chalmers tekniska högskola och Carlanderska sjukhuset. Den apparatur som i inventeringen uppgavs vara mest störkänslig redovisas i tabell 5.3.

Som framgår av tabell 5.3 innebär den uppgivna störkänsligheten att endast mycket låga bakgrundsfält tolereras. Detta innebär att det finns risk för konflikter om spårvägen går nära byggnader med sådan apparatur. Då de planerade spårvägssträckningarna kan komma att gå nära vetenskapliga laboratorier (bl.a. SLU) och sjukhus är det viktigt att dessa potentiella problem beaktas vid projekteringen.

Konventionell spårväg matas med en likspänning på 750 V via kontaktledning. En likström (betecknas DC = Direct Current) på typiskt 1000 A matas från kontaktledningen, via spårvagnen och åter via rälsen. Det innebär att det uppstår ett statiskt elektriskt fält från kontaktledningen. När en spårvagn drivs på linjen kommer det att gå en ström som alstrar ett magnetfält. Detta innebär att det bildas magnetfält vid spåret, inte endast när spårvagnen passerar, utan också under den tid som den matas via kontaktledningen.

Även de elektriska apparaterna inne i vagnen som motorer etc. ger upphov till fält. Dessa källor inne i vagnen avtar dock snabbt med avståndet (tredjepotensen på avståndet) varför det framförallt är passagerare och förare som utsätts för dessa fält.

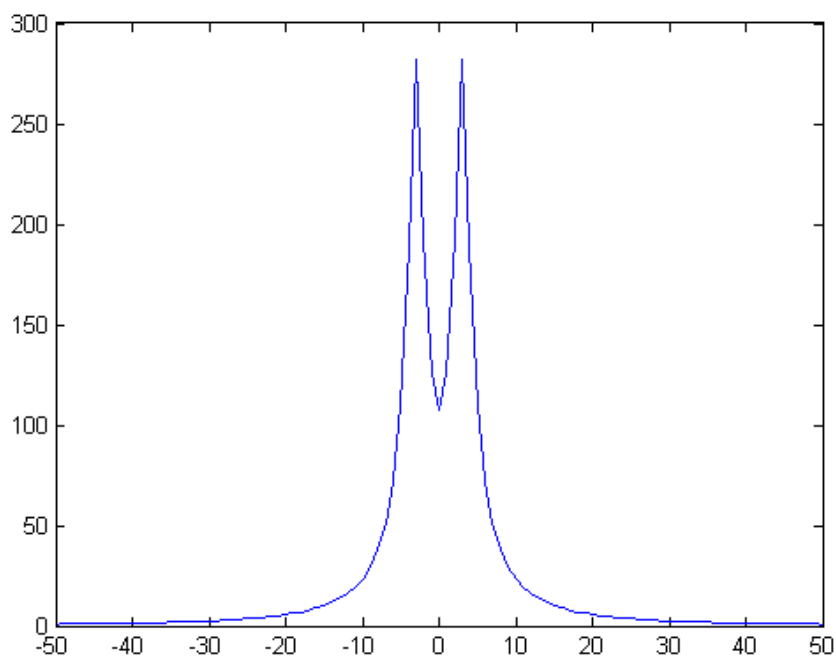
I hus som ligger på lite avstånd från spårvägen har spårvagnens egna fält avtagit så att det är den matande spänningen och strömmen i kontaktledningen samt återgångsströmmen i räl, som alstrar det dominerande fältet. Det elektriska fältet skärmas av byggnadsmaterialen i husets tak och väggar, medan det magnetiska fältet inte dämpas av normala byggnadsmaterial.

Yngve Hamnerius AB

Tabell 5.3 Uppgiven störkänslighet hos apparatur vid inventering för Kringentunneln i Göteborg.

Apparatur	Krav variation
UPS (Ultraviolet Photo emission Spectrometer) med LEED (Low Energy Electron Diffraction). FTIR (Infraröd spektrometer med LEED STM (Scanning Tunnel Microscope) med LEED	0,015 μT
Elektronmikroskop Philips CM200 FEG	0,012-0,3 μT vid 50 Hz
NMR Oxford Magnet Instruments	$\Delta B = 0,1 \mu\text{T}$
Elektronstrålelitograf	$\Delta B = 0,08 \mu\text{T}/2\text{h}$
SQUID magnetometer (Superconducting Quantum Ineterference Device)	0,1 μT
Medicinsk MRI (Magnet Resonance Imiging) 1 tesla Simens-Elema	Tillverkares krav "40 m från tåg"

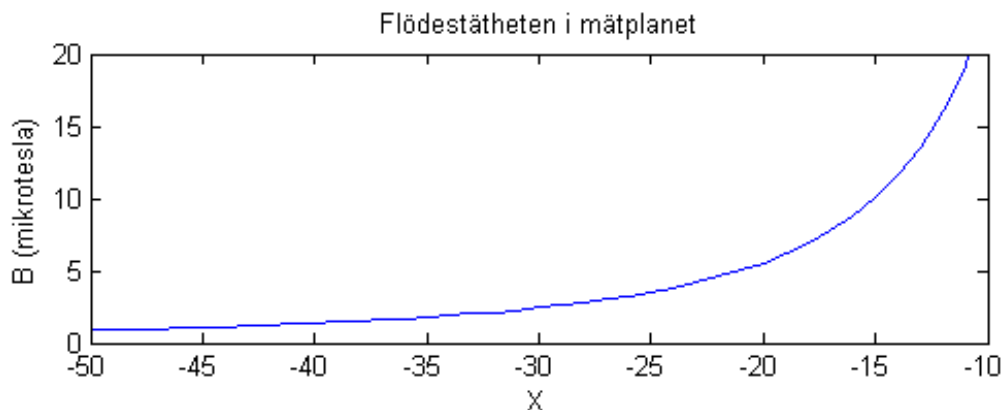
Magnetfältet har beräknats 1 m över mark (1 m över räil) 50 m ut åt båda sidor från en tvåspårig spårväg där det går ett spårvagnståg på vardera spåret och båda spårvagnarna drar 1000 A, se figur 5.7.



Figur 5.7 Beräknat magnetfält (i μT) 1 m över räils, 50 m ut från en tvåspårig spårväg där ett tåg på vardera spår drar 1000 A.

Yngve Hamnerius AB

Vi ser att fältet blir högst (ca 280 μT) direkt över rälsen, men att fältet avtar snabbt med avståndet. I figur 5.8 visas magnetfältet från 10 – 50 m ut från spår-vägen. Origo (0 m) i beräkningarna har lagts mitt emellan de två spår-en.



Figur 5.8. Beräknat magnetfält (i μT) 1 m över räls, 50 m till 10 m ut från en konventionell tvåspårig spårväg där ett tåg på vardera spår drar 1000 A.

Det beräknade fältet är från en spårvagn på vardera spår som drar 1000 A vid några olika avstånd visas i tabell 5.4.

Tabell 5.4. Beräknat magnetfält (i μT) 1 m över räls, på några olika avstånd ut från en konventionell tvåspårig spårväg där ett tåg på vardera spår drar 1000 A.

Avstånd från mitt emellan spår	Magnetfält
(m)	(μT)
15	10
47	1,0
104	0,2
147	0,1

Strömmen mattas in från likriktarstationer med ca 1 km avstånd. Nära en inmatningspunkt dras nästan all ström från den inmatningspunkten, vilket är det fall som redovisas i ovanstående tabeller. Ett tåg mittemellan två inmatningspunkter drar ungefär lika stor ström från vardera inmatningspunkten, vilket innebär att magnetfältet i en punkt mellan inmatningsstationerna blir lägre än vad beräkningen ovan redovisar.

Dubbelkopplade tåg kan dra den dubbla strömstyrkan vilket innebär att fälten kan bli dubbelt så höga.

Yngve Hamnerius AB

En sammanfattning av avsnitt fem visar att alla fordon av järn ger en lokal störning av det jordmagnetiska fältet. För ett väldesignat fordon med laddteknik kan störfälten i stort sett begränsas till denna störning.

För konventionell spårvägsteknik ger strömmen i kontaktledning och räl ett betydligt större magnetfält. I avsnitt 6 diskuteras olika sätt att begränsa detta magnetfält för att klara kraven i universitets och sjukhusmiljöer



Spårvagn i Göteborg.

6 Reduktion av elektromagnetiska fält från spårväg

Det finns ett antal olika sätt att reducera de elektriska och magnetiska fälten från spårvägstrafik, vi startar med de elektriska fälten. Om spårvagnarna är väl designade kommer elektriska fält som alstras inne i vagnen att skärmas bort. För konventionell spårväg kommer kontaktledningen att alstra ett elektriskt fält.

Enligt Starkströmsföreskrifterna skall kontaktledningen hänga minst 5 meter över gatan. Hur högt den skall hänga kan variera. Enligt Trafikkontorets i Göteborg norm ska höjden i upphängningspunkten inte överstiga 5,3 meter.

6.1 Reduktion av elektriska fält

Den elektriska fältstyrka som uppstår mellan kontaktledningens 750 V och markens nollpotential skulle bli 150 V/m om vi hade haft en geometri med två plattor som i figur 2.2. Nu är kontaktledningen ingen platta utan en tunn tråd varför den högsta elektriska fältstyrkan blir nära kontaktledningstråden och betydligt lägre vid gatunivå. En sådan statisk elektrisk fältstyrka finns naturligt på jorden varför den inte bör ge upphov till några problem. Fältstyrkan på gatunivå ger ej upphov till att personer utsätts för gnisturladdningar.

Normala byggnadsmaterial som trä, betong och tegel skärmar det elektriska fältet från spårvägen, varför bidraget inomhus blir mycket lågt. Jag ser därför inte att det i normalfallet är motiverat att vidtaga några åtgärder för att reducera det elektriska fältet från spårvägstrafiken.

Det enda påtagliga problemet med det elektriska fältet är att det kan ge upphov till gnisturladdningar vid dålig kontakt mellan strömavtagaren och kontaktledningen vilket kan ge upphov till radiostörningar. Här finns normer som begränsar hur starka dessa störningar får vara, se avsnitt 5.3.

6.2 Reduktion av magnetiska fält

I föregående avsnitt delade vi upp spårvagnens magnetfältsbidrag i olika delar:

1. Störning av jordmagnetiska fältet på grund av järn i spårvagnen
2. Störning av framdrivningssystemet i vagnen
3. Störning på grund av strömmatning till vagnen

Störningen på grund av järn i spårvagnen kan i princip minskas genom att använda andra material än stål i vagnen. I praktiken är detta en begränsad möjlighet då alternativen till stål innebär en stor extrakostnad. Som framgår av avsnitt 5.1 är störningen på grund av vagnens järn ganska begränsad och med begränsad utsträckning.

Inne i spårvagnarna finns lokala källor till fält på grund av framdrivningssystemet i vagnen. Genom att se till att strömmatningen görs med sammanhållna fram- och återledare kan dessa källor begränsas. Detta är möjligt att genomföra för fordon med laddteknik, men går ej att genomföra för konventionella spårvagnar där fram och återledare är åtskilda. För välbyggda fordon med laddteknik har magnetfälten normalt ett snabbt avståndsavtagande, varför de inte påverkar spårvägens omgivning i någon högre grad.

Yngve Hamnerius AB

6.2.1 Reduktion av magnetfält från strömmatningen vid konventionell spårväg

Den väsentliga källan till fält i omgivningen till konventionell spårväg är spårvagnarnas strömförsörjning. Fälten uppkommer framförallt genom att fram- och återledare är separerade.

Enligt Starkströmsföreskrifterna skall kontaktledningen hänga minst 5 meter över gatan. Hur högt den skall hänga kan variera. Enligt Trafikkontorets i Göteborg norm ska höjden i upphängningspunkten inte överstiga 5,3 meter.

De magnetiska fälten från strömmatningen kan på ett avstånd från spårvägen beskrivas med den approximativa formeln 6.1 som beskriver fältet från två oändligt långa ledare med avståndet d på avståndet r där samma strömstyrka I_1 går i kontaktledning och räl

$$r_2 - r_1 \approx d \quad r_2 \approx r_1 \approx r$$

$$\boxed{B \approx \frac{d \cdot \mu \cdot I_1}{2 \cdot \pi \cdot r^2}} \quad (T) \quad (6.1)$$

Vi ser att magnetfältet avtar med avståndet i kvadrat så det är alltid en fördel om spårvägen kan förläggas på ett avstånd från störkänslig utrustning.

Vidare är magnetfältet direkt proportionellt mot strömstyrkan. Strömstyrkan beror på hur mycket det enskilda spårvägståget drar samt på hur många spårvägståg som matas med ström samtidigt via den aktuella kontaktledningen.

Det enskilda spårvägstågets strömförbrukning bestäms av konstruktion och krav på prestanda som vikt, acceleration och maxfart. Dessa delar är endast begränsat påverkbara om man skall ha en väl fungerande spårvägstrafik. Som ett exempel kan nämnas att för den nya spårvägen i Lund planeras maxhastigheten på lokala linjer vara 70 km/tim. På regionala linjer skall spårvagnarna kunna framföras i hastigheter upp till åtminstone 100 km/tim. För acceleration anges 1,2 m/s² som ett normalt värde på acceleration i spårfordon för lokal trafik. Värdet är en avvägning mellan restid och komfort. Dessa krav fastlägger i stort sett vilken strömförbrukning som spårvägstågen kommer att ha och innebär inte något större spelrum för åtgärder att hålla nere strömstyrkan med tanke på magnetfält.

Hur många spårvägståg som matas via kontaktledningen styrs av hur man fördelar strömmatningen till spårvägen. Vid få inmatningspunkter kommer fler spårvägståg att behöva matas av varje inmatningspunkt vilket leder till större summaströmmar. För att hålla ned summaströmmen (och därmed det maximala magnetfältet) är det en fördel att ha ett flertal inmatningspunkter, strategiskt utplacerade över spårnätet. Detta innebär också ett lägre spänningsfall och lägre effektförluster i kontaktledningarna.

6.2.2 Magnetfält på grund av vagabonderande strömmar

En annan fördel med fler inmatningspunkter är att det minskar förekomsten av vagabonderande spårvägsströmmar. Dessa vagabonderande spårvägsströmmar beror på att normalt är alla räler ihopkopplade och jordade i hela spårvägsnätet, vilket innebär att i ett maskat spårvägsnät finns det flera alternativa vägar för återgångsströmmen att ta. Ur elsäkerhetsskäl skall spårvägsrälerna vara jordade

Yngve Hamnerius AB

så att ingen farlig potential finns på dessa. Detta öppnar upp för vagabonderande strömmar via jord. Om delar av återgångsströmmen, inte tar samma sträckning som kontaktledningsströmmen, är det inte längre balans mellan fram- och återgående ström på en sträckning. Formel 6.1 kommer inte att gälla för denna obalansström, utan formel 6.2.

$$B = \frac{2\pi \cdot 10^{-7} I}{r} \quad (\text{T}) \quad (6,2)$$

Fältet från obalansströmmen avtar endast med ett över avståndet r , medan magnetfältet från de balanserade strömmarna avtar med kvadraten på avståndet. Detta får till resultat att magnetfältet från den vagabonderande strömmen har en större utsträckning ut från spåren,

Om vi tar ett exempel med en tågström I_1 på 800 A (maximal strömförbrukning för de spårvagnar som användes i Göteborg vid arbetet med Kringentunneln) och beräknar magnetfältet på avståndet $r = 20$ m med kontaktledningen $d = 5,5$ m över räl erhålls ett magnetfält på $2,2 \mu\text{T}$. På avståndet 30 m blir magnetfältet blir magnetfältet $0,98 \mu\text{T}$.

Säg att vi har istället för balans, som i beräkningen ovan, kommer 10 % av återgångsströmmen, dvs. 80 A att gå en annan väg, vilket magnetfält ger då dessa 80 A upphov till på avståndet 20 m? Sätter vi in i formel 6.2 får vi ett beräknat magnetfält på 20 m på $2,5 \mu\text{T}$, på avståndet 30 m blir magnetfältet $1,68 \mu\text{T}$.

Vi ser att en vagabonderande ström, som endast är 10 % av den totala strömmen, ger upphov till större magnetfält, speciellt på större avstånd, på grund av det svaga avståndsavtagandet.

Ström ut och in vid varje likriktarstation är alltid i balans. Genom att ha tätare mellan likriktarstationerna blir det mindre fördelaktigt för returströmmen att gå en omväg via annan linjesträckning varför andelen vagabonderande ström minskar och därmed magnetfältet.

6.2.3 Användning av annan matning än kontaktledning

Som framgår av formel 2.1 är magnetfältet direkt proportionellt mot avståndet d mellan fram och återgångsström. Det är därför intressant att se på alternativ till kontaktledning. Det mest radikala är batteri- eller superkondensatordrift varvid ingen strömmatning behövs.

Ett annat alternativ, som bland annat används i Bordeaux stadscentrum, är att spårvagnarna matas via en strömskena i marken. Syftet med denna lösning i Bordeaux är nog främst estetisk, men den kan också användas för att reducera magnetfältet. Med en strömskena mellan rälerna kan avståndet d mellan fram och återgående ström minskas rejält och magnetfältet med ca en faktor 10. Detta är alltså ett mycket kraftfullt sett att reducera magnetfältet.

Om strömskenan ligger i gatumark, eller annan mark som allmänheten har tillträde till, måste man se till att personer inte kan komma i kontakt med den farliga spänningen på den oskyddade strömskenan. I Bordeaux sker detta genom att skenan är indelad i 8 m ledande sektion, följt av en 3 m isolerande sektion. Endast sektionen under spårvagnen är spänningssatt.

Yngve Hamnerius AB

Man kan också använda sig av induktiv trådlös överföring av strömmen till spårvagnen. Då ligger en magnetslinga i marken och en mottagnings slinga finns i spårvagnen. Det magnetiska växelvärdet som alstras av magnetslingan i marken plockas upp av mottagnings slingan i spårvagnen, ungefär som de två lindningarna i en transformator.

Detta är en ny teknik för att strömförsörja spårvagnar. Bombardier kallar det Primove system, de har byggt en 800 m lång testbana i Augsburg i Tyskland. Under 2014 resp. 2016 togs två linjer i drift i Nanjing, Kina³⁸. Varje markspole är 8 m lång och precis som i Bordeaux, så är det bara sektionen under spårvagnen som är aktiverad. Om denna teknik skall användas för spårvagnar i Uppsala behövs mer data om magnetfälts styrka och frekvens för att bedöma om tekniken uppfyller kraven på magnetfält. Det finns en hel del information om detta system på nätet, men all jag funnit är av typen "glättig" marknadsföringsinfo utan några tekniska data.



Figur 6.1 Bombardier Primove batterispårvagn som laddas induktivt i Nanjing, Kina.

6.2.4 Metoder för att minska längden på den magnetfältsalstrande slingan använd i Kringentunneln Göteborg

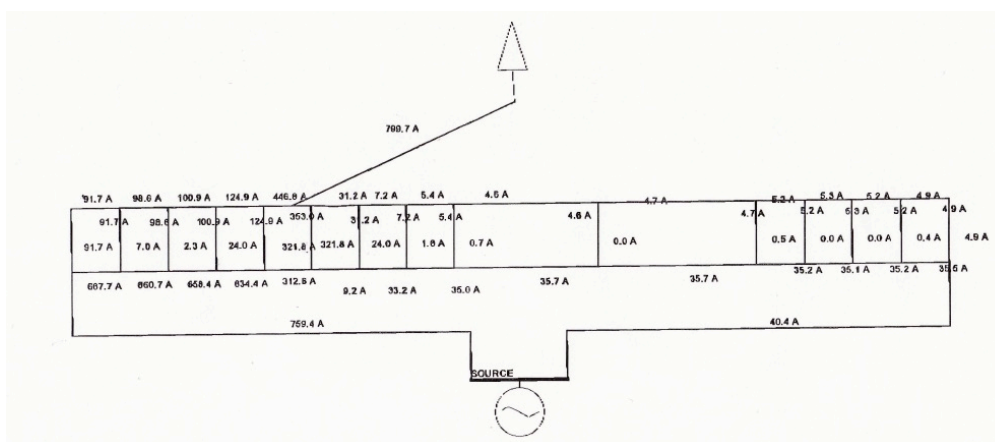
Genom att minska längden på den magnetfältsalstrande slingan, bestående av kontaktledning och räl, kan magnetfältet begränsas. Detta användes vid byggande av Kringentunneln i Göteborg som passerade under forskningslaboratorier med mycket känslig apparatur vid Chalmers tekniska högskola. Den lösning som jag var med att utarbeta byggde på att man lade en matningsledning nära strömåterförande räl. Denna ledning har en mycket större area än kontaktledningen. Var 12:e meter finns en uppmatning från matningsledningen till kontaktledningen. Detta innebär att matningsströmmen kan välja att gå i matningsledningen eller i kontaktledningen. Just där spårvagnen befinner sig kommer naturligtvis hela

³⁸ <https://www.polisnetwork.eu/wp-content/uploads/2019/06/nimh-and-primove-systems-2-finalpolis.pdf>

Yngve Hamnerius AB

strömmen att gå via kontaktledningen eftersom det endast är den som har kontakt med spårvagnen. I övrigt kommer strömmen företrädesvis att gå i matningsledningen eftersom den på grund av sin större area erbjuder ett mycket mindre motstånd. I figur 6.2 visas en simulering av strömmen i kontaktledning och matningsledning.

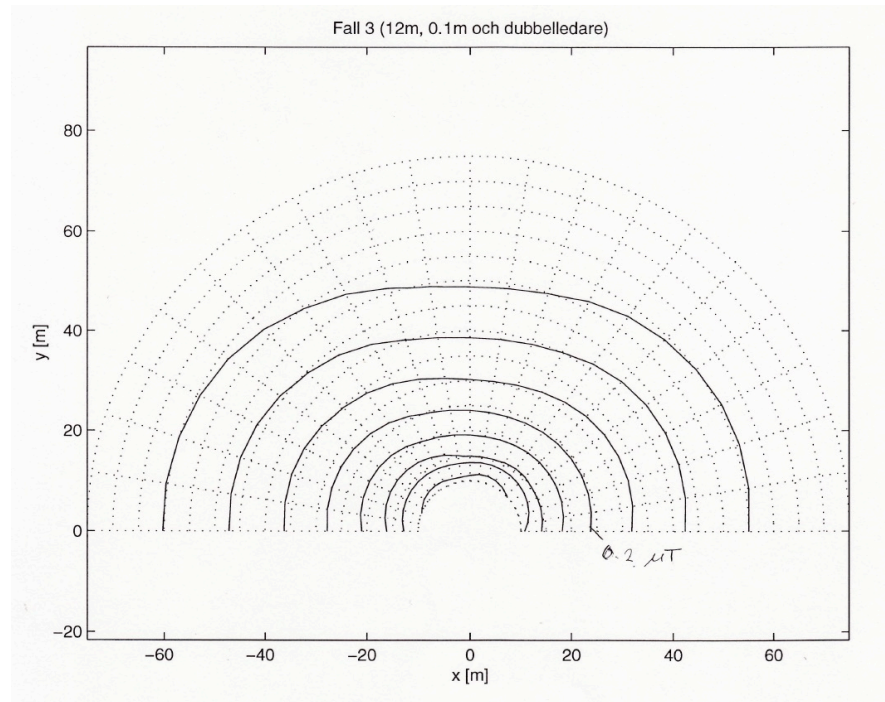
Som framgår av figur 6.2 kommer huvuddelen av strömmen att gå i matningsledningen (mittensta ledningen). Då denna ledning ligger nära strömförande räl kommer fälten från dessa båda ledare att delvis ta ut varandra vilket resulterar i ett lägre magnetfält. I tunneln är spårens båda räl isolerade från varandra och från anslutande räls utanför tunneln. Genom detta förfarande kan man tvinga all återgångsström att gå i den räl som är närmast matningsledningen samt förhindra vagabonderande strömmar i tunneln. Att använda isolerade räl var möjlig i tunneln. Det är sannolikt svårare att uppnå detta om rälsen ligger i gatumark.



Figur 6.2 Bilden visar ett kretsschema med strömfördelning i (A) i kontaktledning (övre linje) och matningsledning (mittensta linjen) när tunneln matas från likriktaren (source) till bägge ändar av tunneln när en spårvagn drar maxström, 800 A (pilen).

Detta leder till ett lägre magnetfält i tunnels omgivning, en simulering av magnetfältet från spårvägen visas i figur 6,3. Vi ser att magnetfältet blir 0,2 μT ca 25 m ut från spåret. Spårvagnen drar 800 A, det vill säga samma ström som vi räknade på i avsnitt 6.2.2. Där fick vi för en konventionell strömmatning med kontaktledning och räl ett magnetfält på 2,2 μT på avståndet 20 m och ett magnetfält på 0,98 μT på avståndet 30 m. Om vi sätter in avståndet 25 m i formel 6.1 erhålls magnetfältet 1,41 μT . Vi ser att införandet av matningsledningen har reducerat magnetfältet till 0,2 μT en reduktion med ca 7 gånger.

För Kringentunneln valde vi att ha en tvärsnittsarea på matarledningen som var mycket större än kontaktledningens area. På den känsliga sträckan under Chalmers var kontaktledning och matarledningen förbundna var 12:e meter. Strömmen till spårvagnen gick därför företrädesvis i matarledningen, fram till den sektion där spårvagnen drog ström.

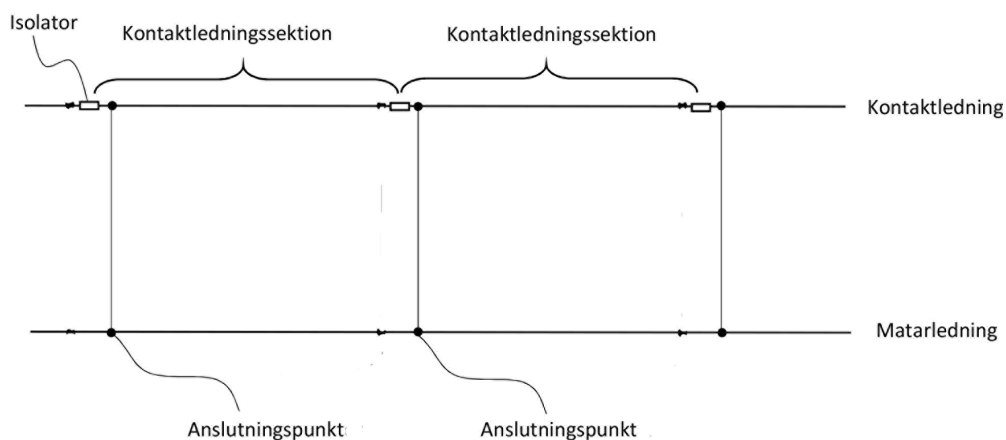


Figur 6.3 Beräknat magnetfält från en spårvagn som drar en ström på 800 A enligt figur 6.2. Spårvagnspåret är placerat i origo. Magnetfältets isoflödestäthetslinjer visas. Kurvan närmast spåret visar nivån 3,2 μT och sedan följer 1,6, 0,8, 0,4, 0,2, 0,1, 0,05 samt 0,025 μT .

6.2.5 Metoder för att minska längden på den magnetfältsalstrande slingan använd i Lunds spårväg

Som framgår av figur 6.2 kommer strömmen i kontaktledningen att huvudsakligen gå i den sektion där spårvagnen befinner sig. Denna lösning, som användes vid byggandet av Kringentunneln, innebar en substantiell reduktion av magnetfälten i byggnader nära banan.

Strömmarna i kontaktledningen i de sektioner där spårvagnen inte är blir låga men inte noll. Genom att införa ett avbrott i varje sektion kan man helt förhindra strömmar i andra sektioner och därmed få ändå lägre magnetfält. I figur 6.4 visas en lösning jag tagit fram för den nya spårvägen i Lund.



Figur 6.4. Kontaktledning med en isolator i varje kontaktledningssektion.

Yngve Hamnerius AB

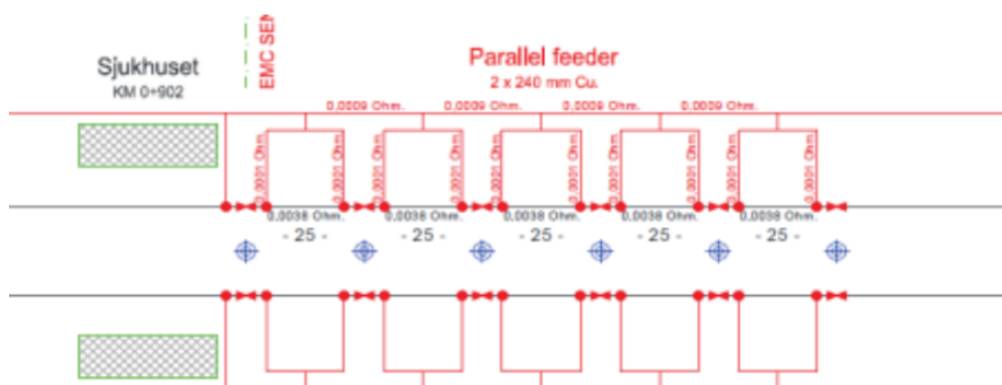
Denna lösning har flera fördelar:

- Ström kommer endast att gå i kontaktledningen i den sektion som spår-vagnen befinner sig i.
- Magnetfälten blir låga, lägre än alternativet som ges i figur 6.2.
- Inget krav på att matarledningen skall ha stor tvärsnittsarea.

I och med att inga alternativa strömvägar finns i denna lösning, behöver man inte använda en matarledning med låg resistans vilket innebär en ytterligare kostnadsbesparing.

Isolatorn som används i Lund har bara ett avbrott på ca 1 cm, vilket är mindre än strömavtagarens bredd, vilket innebär att strömavtagaren får ström hela passagen av avbrottet. I figur 6.4 sitter isolatorn så att den kan fästas i en kontaktledningsstolpe. Om kontaktledningen är upphängd med bärlina finns det en möjlighet att placera avbrottet mitt emellan stigarledningarna, vilket halverar den maximala slingarean och därmed reducerar magnetfältet ytterligare.

Ett alternativ till denna lösning utarbetades av Dick van Bekkum där man använder två lågresistiva stigare mellan matningsledning och kontaktledning, se figur 6.5.



Minute of Meeting "SPIS-Sectioning-Phasing-v03.pdf": EMC – Phasing of sectioning.
Trivector / Microsim - Dick van Bekkum. January 2015.

Figur 6.5 Alternativ design med två stigare i varje sektion.

Vid projekteringen av spårvägen i Lund simulerades magnetfältet för en mängd fall³⁹. Som ett exempel visar jag magnetfältsimuleringar för två 32 m långa spår-vagnar som vardera drar en ström på 1000 A som möts i en sektion. Simuleringen använder lösningen i figur 6.5 med dubbla matningsledningar ±35 cm från vardera spårets centrum nedgrävda 30 cm under rälerens centrum. I tabell 6.1 visas en simulering med 25 m långa matningssektioner hur magnetfältet blir på olika avstånd när en spårvagn passerar.

³⁹ D. van Bekkum "Tram Lund Electromagneticcompatibility (EMC) Magnetic Emission Analysis" Version: 0.8 Date: July 4th, 2015

Yngve Hamnerius AB

Tabell 6.1 Beräknat max och min magnetfält när två spårvagnar som drar 1000 A möts i en 25 m matningssektion.

r	max Bt	min Bt	
[m]	[nT]	[nT]	
50	63	20	
60	38	14	
70	25	10	
75	21	9	
80	17	7	
85	15	6	
90	12	5	
103	8	4	
140	4	2	
144	3	2	
150	3	1	
165	2	1	
205	1	1	
238	1	0	
250	1	0	
270	1	0	
380	0	0	

Om matningssektionen minskas till 10 m reduceras magnetfältet ytterligare, se tabell 6.2.

Tabell 6.2 Beräknat max och min magnetfält när två spårvagnar som drar 1000 A vardera möts i en 10 m matningssektion.

r	max Bt	min Bt	
[m]	[nT]	[nT]	
50	48	0	
60	33	0	
70	24	0	
75	21	0	
80	19	0	
85	16	0	
90	15	0	
103	11	0	
140	6	0	
144	6	0	
150	5	0	
165	4	0	
205	3	0	
238	2	0	
250	2	0	
270	1	0	
380	0	0	

Yngve Hamnerius AB

Om man för en jämförelse beräknar magnetfältet på 50 m avstånd när samma två spårvagnar möts på en konventionell spårväg utan sektionering blir max magnetfältet ca 940 nT.

Lösningen i van Bekkum's rapport, (figur 6.5) med 25 m sektion ger på avståndet 50 m, ger en reduktion på 93 %, lösningen enligt figur 6.4 ger en reduktion på 80% på 50 m avstånd. Huvudförklaringen till att reduktionen är högre med lösningen i figur 6.5 är att med stigarledningar i båda ändarna av sektion bildar matningsströmmen två motriktade slingor vars magnetfält delvis tar ut varandra. En nackdel med lösningen visade sig vara att den redan var patenterad.

6.3 Läckströmmar och galvanisk korrosion

De vagabonderande strömmarna ger inte bara extra magnetfält utan kan också, speciellt i DC fallet, ge upphov till galvanisk korrosion på andra metallstrukturer och ledningar som teleledningar.

Läckströmmar som kan slippa ut från likströmssystem och genom galvanisk korrosion orsaka skador på omkringliggande metallkonstruktioner, t ex på rörledningar och broar behandlas i standarden SS-EN 50122-2 "Järnvägsanläggningar - Fasta installationer - Elsäkerhet, jordning och returströmkrets - Del 2: Åtgärder för att motverka inverkan från läckströmmar orsakade av likströmsbanor". Hur mycket ström som läcker ut beror på spårets ledningsförmåga och andra liknande förhållanden och hur dessa uppskattas och beräknas beskrivs utförligt i standarden. Den används lämpligen tillsammans med SS-EN 50162, Skydd mot korrosion förorsakad av läckströmmar från likströmssystem.

6.4 Reduktion av magnetfält från matarstationer

För att mata ström till spårvägen behövs ett antal likriktarstationer. Dessa stationer liknar konventionella nätstationer där högspänd 50 Hz ström (vanligen 10 – 20 kV) transformeras ned till matningsspänningen för spårvägen och likriktas och matas ut.

En matarstation består av ett ställverk för högspänningen, en eller flera transformatorer, lågspänningsställverk och likriktare. Alla dessa komponenter kan ge magnetiska fält. Då magnetfältet beror på strömstyrkan är det framförallt lågspänningssidan, där strömmen är störst, som ger mest fält. De komponenter som därför är kritiska är transformator, förband transformator till lågspänningsställverk samt lågspänningsställverket. Det är viktigt att dessa komponenter utformas för att avge låga magnetfält. Observera att detta är viktigt då likströmsstationer drivs med växelström fram till likriktarna.

Magnetfälten har en typisk utsträckning upp till ca 5 m från stationen. Kan matarstationen byggas i ett eget friliggande hus som inte är närmare än 5 m från andra hus är sällan magnetfälten från matarstationen några problem. I stadscentrum finns oftast inte några lediga tomter för att placera matarstationer, i det fallet brukar stationerna hysas in i byggnader som kan innehålla bostäder eller andra verksamheter. Vid samlokalisering med andra verksamheter kan det behöva vidtas skärningsåtgärder för att inte magnetfälten skall bli för höga i angränsande rum. Utan några åtgärder är nivåer i angränsade rum på storleksordningen 10 μ T inte ovanliga. En inklädnad av matarstationsrummet med 5 mm

Yngve Hamnerius AB

helsvetsad aluminiumplåt ger en reduktion av magnetfälten. Denna åtgärd reducerar fälten betydligt, men det kan vara svårt att komma ned under $1 \mu\text{T}$ i de mest närbeliggande utrymmena. Dessa bör därför inte användas för stadigvarande vistelse.

Vid likriktning omvandlas 50 Hz ström till likström, detta sker t.ex. i en helvågs trefaslikriktare. Omvandlingen är inte perfekt det uppstår frekvenskomponenter vid bl. a. 300 Hz, för att inte dessa skall komma ut i spårvägsmatningen är det viktigt att dessa växelkomponenter filtreras bort. I annat fall kommer man att alstra växelomagnetfält från ett likströmssystem.

6.5 Skärmning av magnetfält

Som framgick av avsnitt 5 finns det teknisk apparatur som är ytterst störkänslig för magnetfält. Den elektronstrålelitograf som nämns i tabell 5.3 tålde endast en magnetfältsändring på $\Delta B = 0,08 \mu\text{T}$ under en två timmarsperiod. Detta krav var inte möjligt att uppfylla genom åtgärder på spårvägen. Lösningen här var att placera litografen i ett skärmat rum.

Vid Kungsbron i norra delen av Stockholms centralstation har man byggt en fastighet över järnvägsspåren. Även här har man använt sig av skärmning för att reducera magnetfälten i fastigheten.

Det finns flera sätt att skärma magnetfält. Vid användning av skärmlåtar kan dessa antingen vara gjorda av goda ledningsmaterial som koppar och aluminium eller material med hög permeabilitet (magnetisk ledningsförmåga) som transformatorplåt eller speciallegeringar som mymetall.

Båda materialtyperna kan användas för att reducera växelomagnetfält, mest kostnadseffektivt är oftast aluminiumplåt. Den skärmning jag designade för Kungsbrohuset innehåller bl.a. tre lager 5 mm aluminiumplåt på nedersta golvplan.

För DC magnetfält fungerar *endast* material med hög permeabilitet. Skärmrummet där elektronstrålelitografen är placerad i är gjort av mymetall. Användning av plåtskärmning innebär ofta stora materialkostnader.

Ett alternativ till plåtskärmning är att sätta upp skärmslingor vid spårvägen. Avsikten är att alstra ett motriktat magnetfält så att summan av spårvägens fält och skärmslingans fält blir mindre. För att detta skall fungera bra, bör en sådan slinga placeras så nära spårvägen som möjligt och ha samma utbredning i höjddled som slingan kontaktledning och räil. Längden på skärmslingan bestäms av hur långt område man vill skydda. För att driva kompensationsströmmen i skärmslingan, vid DC spårväg, krävs ett aktivt system med elektronik vilket innebär underhållsbehov och driftskostnader för strömförbrukning. Vid växelströmsdrift ger även en rent passiv skärmslinga en viss reduktion, men även för detta fall fås bättre skärmning med ett aktivt system.

7 Elmiljökrav vid upphandling och kontroll av fordon

Vid upphandling av fordon finns det ett antal elmiljökrav som bör ställas. Enligt EU:s EMC direktiv skall spårvägen uppfylla krav på emission och immunitet för elektromagnetiska fält. Med detta avses att spårvägen inte får emittera för höga fält så att de stör annan utrustning (emission) samt att de måste ha viss tålighet mot fält från andra källor (immunitet). Bestämmelserna för tåg och spårvagnar finns dokumenterade i harmoniserade CENELEC standarder, nämligen;

EN 50121-1:2006 Railway applications - Electromagnetic compatibility -- Part 1: General.

EN 50121-2:2006 Railway applications - Electromagnetic compatibility -- Part 2: Emission of the whole railway system to the outside world.

EN 50121-3-1:2006 Railway applications - Electromagnetic compatibility -- Part 3-1: Rolling stock - Train and complete vehicle.

EN 50121-3-2:2006 Railway applications - Electromagnetic compatibility -- Part 3-2: Rolling stock – Apparatus.

EN 50121-4:2006 Railway applications - Electromagnetic compatibility -- Part 4: Emission and immunity of the signaling and telecommunications apparatus.

EN 50121-5:2006 Railway applications - Electromagnetic compatibility -- Part 5: Emission and immunity of fixed power supply installations and apparatus.

Som ett minimikrav bör man också kräva att SSM:s rekommendationer angående allmänhetens exponering för elektromagnetiska fält uppfylls i alla utrymmen i fordonen där människor vistas. Dessa krav omfattar hela frekvensområdet från 1 Hz till 300 GHz. Förutom de lågfrekventa fält som diskuterats tidigare i rapporten omfattar det radiofrekventa fält från kommunikationsutrustning och annan apparatur som RFID (Radio Frequency IDentification). RFID används till exempel för biljettsystem, se figur 7.1. Vid en mätning på biljetterminalerna på Göteborgs spårvägar visade det sig att den elektriska fältstyrkan översteg ICNIRPs referensvärde. En mätning som SSM hade låtit utföra visade dock att ICNIRP:s basic restriction var uppfylld, varför SSM:s rekommendation var uppfylld⁴⁰.

SSM:s rekommendationer för allmänheten skyddar endast akuta effekter av fälten men ej för eventuella långsiktiga effekter som barnleukemi. Man bör därför även ha med försiktighetsprincipen i kravställandet. Lämpligen som ett riktvärde, så att man kan väga de eventuella merkostnader som detta krav medför, mot den minskade magnetfältsnivån.

Ett sådant krav omfattar endast växelkraftfält, men bör även ställas på likströmsmatade spårvagnar då det inte är säkert att strömmarna i vagnen är endast likström. Moderna elbilar är förvisso batteridrivna (DC), men likströmmen omvandlas till trefas växelström, före den matas till elmotorn. Man kan inte utsluta att liknande lösningar kan komma att användas i moderna spårvagnar.

⁴⁰ E Hansson Exposure from RFID Systems Master of Science Thesis Department of Signal and Systems Chalmers University of Technology, Göteborg, 2008.

Yngve Hamnerius AB



Figur 7.1 Läsare för RFID-biljetter som används av Västtrafik arbetar vid frekvensen 13,56 MHz.

Vid SJ:s upphandling av dubbeldäckartågen X40 hade man ställt krav på magnetfälten inne i tågen enligt SSM:s rekommendationer, men hade inga krav kopplade till försiktighetsprincipen. De levererade tågen uppfyllde SSM:s rekommendationer. De uppmätta magnetfälten var ca 40 μT , på vissa platser i vagnarna, vilket ligger under SSM:s rekommendation som är 300 μT vid tågfrekvensen 16,7 Hz. När tågpersonalen fick kännedom om dessa mätvärden ledde det till stor oro och protester. De jämförde inte med SSM:s rekommendationer utan med Socialstyrelsens uttalande om fördubblad cancerrisk vid 0,4 μT .

8 Diskussion och slutsatser

Anläggandet av ny spårväg kommer att innebära att elektriska och magnetiska alstras kring spårvägen. Magnetfälten som alstras kring spårvagnarna kan delas i ett antal punkter:

1. Oavsett vilken lösning som väljs, konventionell spårvagn eller med laddteknik, kommer man att få en störning av det jordmagnetiska fältet på grund av stålet i spårvagnen. Som framgår av avsnitt 5.1 är denna störning inte så stor och har ingen större utsträckning. I tabell 5.2 är störningen beräknad för ett oändligt långt stålrör. Störningen $1 \mu\text{T}$ beräknas 6,9 m från centrum på röret, $0,5 \mu\text{T}$ beräknas 9,8 m från centrum på röret. På längre avstånd blir det en betydande överskattning varför nivån $0,1 \mu\text{T}$ bör uppnås på mindre avstånd än 20 m.
2. Magnetfält av framdrivningssystemet i vagnen. Detta bidrag beror på hur spårvagnen har konstruerats. För **fordon med laddteknik** bör det vara möjligt att konstruera ett framdrivningssystem som ger låga fältbidrag. Det är viktigt att strömmatningen från strömkällan (batterier, superkondensatorer eller bränsleceller) görs med tätt sammanhållna matningsledare och att motorer och eventuella strömriktare gör i skärmat utförande.
3. a). Fält på grund av konventionell strömmatning via kontaktledning. Detta är den dominerande källan för konventionella spårvagnar. För två spårvagnar som möts och drar 1000 A vardera ger strömmatningen ca $280 \mu\text{T}$ direkt över spåret, ca $23 \mu\text{T}$ 10 m ut från spårvägens centrum och $1 \mu\text{T}$ ca 50 m ut, se figur 5.7. Till magnetfälten från strömmatningen skall läggas bidragen från punkterna 1 och 2 ovan.
b). Fält på grund av konventionell strömmatning via modifierad kontaktledning. Magnetfältets styrka beror på strömstyrkan och slingarean (kontaktledning – räls). Ett sätt att minska slingarean är att som i Bordeaux ha en kontaktledning på marken mellan rälerna (se avsnitt 6.2.3) vilket uppskattningsvis bör minska magnetfältet från matningen med en faktor 10 både på nära och långt håll.
Ett annat sätt att minska slingarean är att som i Kringentunneln, Göteborg eller nya spårvägen i Lund minska längden på den aktiva slingan (se avsnitt 6.2.4). Reduktionen blir större ju kortare slingan är. Riktigt nära kontaktledningen (avstånd mindre än slinglängden) sker ingen större reduktion jämfört med fall 3a, men på längre avstånd sker en stor reduktion. Med lösningen som används i Lund reduceras fältet på 50 m avstånd från $1 \mu\text{T}$ till $0,06 \mu\text{T}$ om slinglängden är 25 m (tabell 6.1) och till $0,05 \mu\text{T}$ om slinglängden är 10 m (tabell 6.2).
4. Strömmatning via kontaktledning, konventionell eller modifierad, innebär risk för gnisturladdningar vid bristfällig kontakt mellan strömvtagare och kontaktledning. Detta kan ge upphov till radiofrekventa störningar, se avsnitt 5.3.

Spårvagnar som matas med kontaktledning kommer att ge alla fältbidragen 1 – 4, där den största källan kommer från strömmatningen 3. Bidraget från strömmatningen kan reduceras enligt punkt 3a, men det kan aldrig bli lika lågt som spårvagnar med laddteknik då dessa endast ger upphov till fältbidragen 1 och 2.

Yngve Hamnerius AB

Ur magnetfältsynpunkt är därför väl utformade spårvagnar med laddteknik att föredra. I det slutgiltiga valet av lösning får man förstås väga in alla övriga faktorer, vilka inte beaktats i denna skrift, som varit fokuserad på magnetfält från spårvägen.

Det är också viktigt att spårvägens matarstationer utformas så att de avger låga magnetfält, speciellt i de fall de byggs in i byggnader med bostäder eller verksamheter där personer vistas stadigvarande.

Vid upphandling av fordon skall krav ställas på EMC enligt EU-krav och elektromagnetiska fält enligt SSM:s rekommendationer. Dessutom bör krav på magnetfält enligt försiktighetsprincipen ställas för platser i fordonen där människor vistas.

Denna rapport har utarbetats av Yngve Hamnerius, Yngve Hamnerius AB. Yngve Hamnerius är professor emeritus i ämnet biologiska effekter av elektromagnetiska fält vid Chalmers tekniska högskola.