

*Magnetfält  
från luftburna  
trefas kraftledning*



EN KARTLÄGGNING  
I STOCKHOLMS STAD

## **Kartläggning av magnetfält från luftburna trefas kraftledningar**

---

Redovisning av beräkningsmodell samt beräkning av årsmedelvärden i  
Stockholms kommun 1994

Rapporten och beräkningsmodellen är sammanställd av  
Jörgen Kiderud, 670430-0034, E89-DATA  
Rapporten är redovisning av examensarbete vid institutionen  
för elektriska anläggningar, KTH

Arbetet är utfört vid  
Stockholms luft- och bulleranalys  
Miljöförvaltningen  
BOX 38 024  
100 64 Stockholm

Stockholm juli 1994

# INNEHÅLLSFÖRTECKNING

|   |    |
|---|----|
| SAMMANFATTNING .....  | 1  |
| INLEDNING   |    |
| Avsikten med undersökningen .....   | 2  |
| Litteraturstudie .....  | 2  |
| BERÄKNINGSMODELL  |    |
| Modell .....  | 3  |
| Motivation till modellval .....   | 4  |
| TEORI FÖR MAGNETFÄLTSBERÄKNING FRÅN KRAFTLEDNING                                |    |
| Magnetfält från en ändlig, rak ledare .....                                     | 5  |
| Trefas strömsystem .....  | 7  |
| Magnetfält från ett trefassystem .....  | 7  |
| Magnetfält från system med mer än tre faser .....                               | 10 |
| Effektivvärdesbildning av magnetfältet .....                                    | 10 |
| Magnetfält från flera ändliga ledningar .....                                   | 11 |
| KARTLÄGGNING AV MAGNETFÄLT I STOCKHOLM  |    |
| Metodval .....  | 12 |
| Kraftledningsnätet i Stockholms kommun .....                                    | 13 |
| Bedömningsgrunder för magnetfält .....  | 15 |
| RESULTAT AV KARTLÄGGNINGEN .....  | 15 |
| SLUTSATSER .....  | 17 |
| REFERENSER OCH LITTERATURFÖRTECKNING  |    |
| BILAGA A Kraftledningar i Stockholm, översikt.                                  |    |
| BILAGA B Magnetfältskurvor för kraftledningar i Stockholm                       |    |
| BILAGA C Kartor med 0.2 $\mu$ T-gräns utritad kring kraftledningar i Stockholm. |    |
| BILAGA D Datorprogrammet MagneFiC   |    |

## Sammanfattning

Det finns misstankar att kraftfrekventa magnetfält kan medföra vissa hälsorisker, men inget går idag att säga säkert. Forskning pågår, och i avvaktan på mer kunskap kan det vara av intresse att ha en uppfattning om i vilken utsträckning och med vilken fältstyrka som magnetfält från kraftledningar förekommer kring bostäder, skolor och arbetsplatser.

Rapporten presenterar en beräkningsmodell för magnetfältsberäkning och visar en översiktlig kartläggning av de magnetfält som alstras av trefas kraftledningar i Stockholms kommun. Kartläggningen visar att det finns byggnader och rekreationsområden som ligger i områden där magnetiska fältstyrkan överstiger Miljöförvaltningens planeringsmål  $0.2 \mu\text{T}$ .

Generellt kan dock sägas att på ett avstånd  $> 90$  m från en kraftledning i Stockholms kommun överskrids ej Miljöförvaltningens planeringsmål som årsmedelvärde.

# Inledning

## Avsikten med undersökningen

Miljöförvaltningen får många förfrågningar från allmänheten om eventuella faror i samband med exponering för magnetfält från kraftledningar. Studier som gjorts visar på vissa tendenser till statistiska samband mellan magnetfältsexponering och cancersjukdomar (Maria Feychting, Anders Ahlbom 1992).

Ytterligare forskning pågår, och i avvaktan på mer kunskap kan det vara av intresse att ha en uppfattning om i vilken utsträckning och med vilken fältstyrka som magnetfält från kraftledningar förekommer kring bostäder, skolor och arbetsplatser. Stockholms luft- och bulleranalys, Slb analys, har fått i uppdrag av hälsoskyddsavdelningen och plan- och trafikavdelningen vid Miljöförvaltningen i Stockholm att sammanställa en kartläggning över magnetfält från kraftledningar i Stockholm.

Kartläggningen och framtagandet av den använda beräkningsmodellen är ett examensarbete för civilingenjörsexamen. Arbetet redovisas i sin helhet i denna rapport.

Beräkningsmodellen som använts för kartläggningen är implementerad som ett datorprogram i Windows-miljö för PC. Programmet beskrivs i Bilaga D.

Rapporten och datorprogrammet syftar till att ge handläggare vid Miljöförvaltningen ett verktyg för att bestämma magnetfältsnivåer kring kraftledningar i Stockholms kommun.

Examinator för examensarbetet är professor Roland Eriksson vid KTH och handledare vid Slb analys är avdelningsingenjör Lars Dahlbom. Strömdata och ledningskonfigurationsdata för kraftledningsnätet i Stockholm har erhållits från Stockholm Energi, Svenska Kraftnät och Vattenfall.

## Litteraturstudie

Målet med litteraturstudien har varit att ta fram eventuella existerande beräkningsmodeller för magnetfält kring kraftledningar samt att finna mätresultat som kan styrka beräkningsmodellen. Följande skrifter har studerats och bidragit med information i ämnet:

Cheng (1989) beräknar magnetfältet från en enkel ledare med begränsad utsträckning med hjälp av vektoranalys och Biot-Savarts lag.

Henning (1992) har tagit fram en modell för beräkning av effektivvärde av magnetfält från tre oändligt långa raka parallella fasledare som för en trefasström. Fältet kan beräknas var som helst kring ledarna.

Pettersson visar hur ett trefas treledarsystem kan uppfattas som två tvåfas tvåledarsystem vars magnetfält kan approximeras med ett matematiskt dipolfält. Fältet kan beräknas på ett avstånd från ledarna som är mycket större än trefassystemets fasavstånd.

Eriksson (1991) redovisar hur en luftledare ovan jord har en spegelledare under jord som representerar returströmmen i marken. Spegelledaren ligger på ett djup mellan 900 och 30000 m för typiska värden på jordresistiviteten och 50 Hz ström.

TRANSMISSION LINE REFERENCE BOOK 345 KV AND ABOVE , TABLE 8.4.1 visar att returströmmar distribuerade i marken kan försummas vid magnetfältsberäkning för ett balanserat trefassystem på ett avstånd mindre än 100 meter från luftledarnas mittpunkt. 100 m är ett litet avstånd jämfört med markreturströmmens djup.

Olsen och Wong (1992) visar att en kvasi-statisk approximation av magnetfältet kring en 60 Hz kraftledning är giltig på ett avstånd på 100 m eller mindre från ledningen. Detta innebär att ett statistiskt magnetfält kan beräknas och sedan kan detta fält variera som funktion av strömmens amplitud och frekvens utan att hänsyn tas till kopplingen mellan tidsvarierande magnetiska och elektriska fält som alltid uppkommer enligt Maxwells ekvationer.

Olsen och Chartier (1992) visar hur magnetfältet från en kraftledning kan reduceras genom att fasledarna placeras i ett system med sex ledare med de tre faserna parvis delade.

Waltré (1987) redovisar beräkningar för oändligt långa ledare med hänsyn tagen till ledarnas nedhäng mellan infästningspunkterna. Nedhänget beror på ledarnas egentyngd.

Olsen, Deno och Baishiki (1988) redovisar en jämförelse mellan uppmätta magnetfältsnivåer från en kraftledning och motsvarande teoretiskt beräknade nivåer. Felkällor och använda approximationer diskuteras.

Henning (1993) jämför beräknade och mätta magnetfältsnivåer kring vissa kraftledningar i Solna och Stockholm.

## Beräkningsmodell

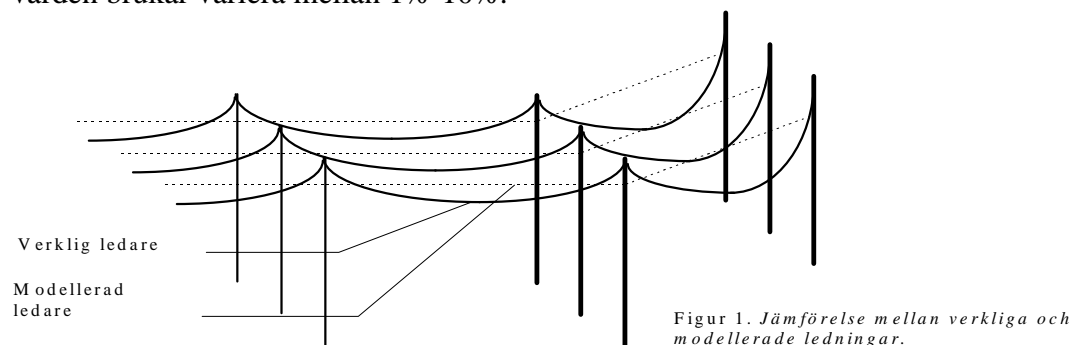
### Modell

Magnetisk flödestäthet, i dagligt tal och hädanefter i rapporten kallat magnetfält, mäts i enheten  $Vs/m^2$ , också benämnt Tesla [T]. Modellen som används i denna utredning för beräkning av magnetfältet från luftburna trefas kraftledningar har följande förutsättningar och begränsningar:

- Magnetfältet kan beräknas i valfri punkt i rymden ( $R^3$ -rummet).
- Trefasströmmarna i systemet är symmetriska.
- Strömmar i marken och i eventuella topplinor försummas.
- Ledarna har godtycklig längd och höjd.
- Ledarna modelleras som helt raka.
- Ledningarna modelleras med flera ledningssegment som kan ligga vinklade i förhållande till varandra.
- Antalet samverkande trefassystem är godtyckligt.

För att kontrollera modellens riktighet har jämförelser gjorts med liknande beräkningsmodeller hos Vattenfall och Stockholm Energi, och kontrollmätningar har gjorts med magnetfältsmätare. Resultatet av kontrollen visar att modellen stämmer väl överens med verkligheten.

Kontrollmätningarna har utförts med magnetfältsmätare av typ Combinova MFM 10. Modellverifieringen har utförts genom att mätning och beräkning har gjorts i samma geografiska punkt och med samma ström i ledningen. Skillnaden mellan mätta och beräknade värden brukar variera mellan 1%-10%.



## Motivation till modellval

Magnetfältets styrka är intressant i området 10-100 m kring en kraftledning. Bebyggelse befinner sig alltid mer än 10 m från en ledning på grund av elsäkerhetsföreskrifter och på ett avstånd större än hundra meter är magnetfältet mycket svagt, kring bakgrundsnivån för kraftfrekventa fält (0.05-0.2  $\mu\text{T}$ ). Det förekommer dock bebyggelse i Stockholm som ligger på ett avstånd på cirka 15 - 20 m från kraftledningar, vilket gör att modellen bör vara giltig även i kraftledningens närområde. Då kraftledningarnas fasavstånd varierar mellan 3-10 m är det inte lämpligt att generellt använda en dipolmodell av den typ Pettersson beskriver.

Strömmarna i ett trefassystem är sällan helt symmetriska, d.v.s. den inbördes fasskillnaden mellan fasströmmarna är inte exakt 120 grader. Osymmetrin i Stockholms kraftnät är dock mycket liten enligt kraftbolagen. Den osymmetri som finns varierar i tiden och kan inte bestämmas exakt. Då målet med magnetfältskartläggningen är att ta fram årsmedelvärden för magnetfältet och uppgifter om årsmedelavvikelsen för fasvinklar inte går att bedöma så har strömsystemen approximerats som symmetriska.

Normalt skall de jordade topplinor som finns över vissa ledningar och fungerar som åskledare och kortslutningsskydd vara strömlösa. De strömmar som induceras i icke isolerade topplinor, eller flyter i dessa topplinorna p.g.a. osymmetri är små jämfört med fasströmmarna. De kan dock leda till magnetfältet inte som normalt avtar som kvadraten på avståndet från ledningen. Detta framträder dock bara på långt avstånd från ledaren vilket innebär att magnetfältet ändå är i samma storleksordning som bakgrundsnivån. För att bestämma om någon ström går i topplinorna, och i så fall hur stor den är, så måste man känna till var och hur linorna är jordade, om de är isolerade med gnistgap m.m. Då det intressanta området för magnetfältet är 10-100 m från ledningen försummas topplinornas eventuella inverkan.

Den strömfördelning som finns i marken p.g.a. en kraftledning befinner sig så djupt att dess inverkan på magnetfältet ovan jord kan försummas.

Faslinornas nedhäng kan modelleras med den teori som t.ex. används för vajrar vid brokonstruktion. För att detta skall bli meningsfullt måste stolphöjd och stolpavstånd för två närliggande stolpar vara känt. Man måste också känna till material och grovlek för alla faslinor. Uppgifter på detta finns hos kraftbolagen, men arbetet med att sammanföra dessa data för Stockholm med beräkningsmodellen är oöverskådligt. Att modellera ledarna som helt raka med höjden satt som ledarnas medelhöjd mellan buk och kedja har kontrollmätningar visat vara en god approximation.

Då kraftledningen är rak kan den oftast med gott resultat approximeras som oändligt lång. Kraftledningsnätet kröker dock en hel del, och i närheten av en krök blir fältet annorlunda. Det är därför meningsfullt att kunna ta hänsyn till detta genom att bygga upp nätet med ändliga ledningssegment som kan ligga vinklade i förhållande till varandra.

I Stockholm förekommer kombinationer av 3, 6 eller 9 ledningar som delar på en kraftledningsgata. Modellen kan därför inte begränsas till att bara gälla ett trefasssystem.

Slutligen skall nämnas att de strömvärden som är aktuella för kartläggningen som beräkningsmodellen syftar till är uppskattade årsmedelvärden, inte uppmätta sådana. Osäkerheten i årsmedelvärdet är av uppgiftslämnaren Svenska Kraftnät bedömd till cirka 25% och det är den största onoggrannhetsfaktorn i kartläggningen.

## Teori för magnetfältberäkning från kraftledning

### Magnetfält från en ändlig, rak ledare

Biot Savarts lag för beräkning av magnetfältvektorn  $\vec{B}$  orsakad av en ström  $I$  i en ledare kan skrivas som (Cheng 1989):

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \cdot \frac{d\vec{l} \times \vec{R}}{R^3} \qquad \vec{B} = \int_{\text{Hela källan}} d\vec{B} \text{ [T]}$$

$I$  = Strömmen i ledaren [A].

$d\vec{l}$  = Ett differentialelement längs strömbanan.

$\vec{R}$  = En vektor från differentialelementet  $d\vec{l}$  till observationspunkten [m].

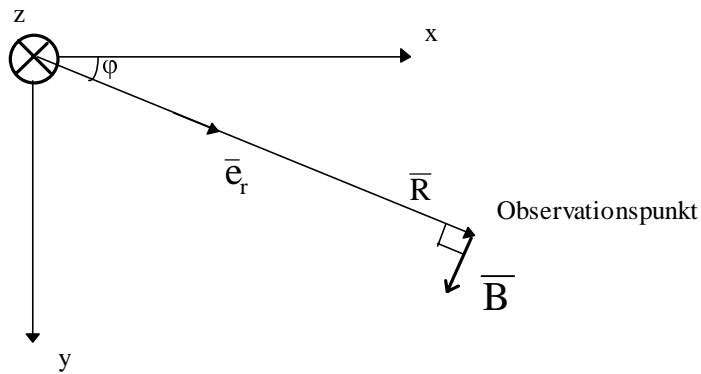
$\mu_0$  = Permeabiliteten i vakuum (och luft),  $4\pi \cdot 10^{-7}$  [H/m].

$d\vec{B}$  = Magnetfältet orsakat av differentialelementet  $d\vec{l}$  i någon observationspunkt.

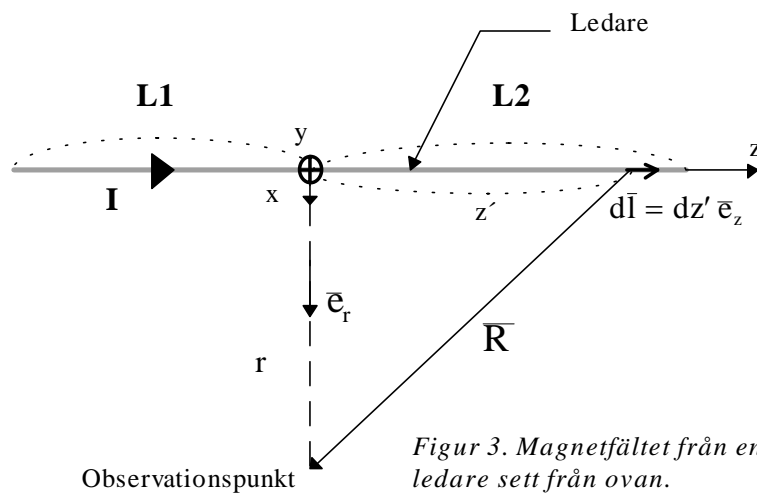
$\vec{B}$  = Totala magnetfältvektorn i observationspunkten [T].

I ett cylinderkoordinatsystem med enhetsvektorerna  $\vec{e}_r$ ,  $\vec{e}_\phi$ ,  $\vec{e}_z$  kan magnetfältet från en ändlig rak ledare härledas med hjälp av vektoranalys enligt:





Figur 2. Magnetfältet från en ledare sett från sidan.



Figur 3. Magnetfältet från en ledare sett från ovan.

$$\bar{R} = r \bar{e}_r - z' \bar{e}_z$$

$$R = \sqrt{r^2 + z'^2}$$

$$d\bar{l} \times \bar{R} = dz' \bar{e}_z \times (r \bar{e}_r - z' \bar{e}_z) = \left\{ \bar{e}_z \times \bar{e}_z = 0 \quad \bar{e}_z \times \bar{e}_r = \bar{e}_\phi \right\} = rdz' \bar{e}_\phi$$

$$\bar{B} = \int_{\text{Hela ledningen}} d\bar{B} = \bar{e}_\phi \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_{-L_1}^{L_2} \frac{rdz'}{(z'^2 + r^2)^{3/2}} = \bar{e}_\phi \frac{\mu_0 I}{4\pi r} \left[ \frac{z'}{\sqrt{z'^2 + r^2}} \right]_{-L_1}^{L_2} = \frac{\mu_0 I}{4\pi r} \left( \frac{L_1}{\sqrt{L_1^2 + r^2}} + \frac{L_2}{\sqrt{L_2^2 + r^2}} \right) \bar{e}_\phi$$

Om  $L_1 \gg r$  och  $L_2 \gg r$  så kan resultatet ovan skrivas som:

$$\bar{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi r} (1+1) \bar{e}_\phi = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \bar{e}_\phi$$

vilket känns igen som magnetfältet på avståndet  $r$  från en oändligt lång rak ledare som för strömmen  $I$ .

Beräkning av magnetfält från en ändlig respektive oändlig ledare skiljer sig endast i om det generella uttrycket  $\frac{1}{4\pi r} \left( \frac{L_1}{\sqrt{L_1^2 + r^2}} + \frac{L_2}{\sqrt{L_2^2 + r^2}} \right)$  (ändlig ledare) eller specialfallet  $\frac{1}{2\pi r}$  (oändlig ledare) används. I fortsättningen används specialfallet oändligt långa ledare i härledningen så att formlerna inte blir onödigt långa. Vid praktiska beräkningar används dock ändliga ledningssegment oftast, men skillnaden ligger endast i ovanstående uttryck vilka alltid kan bytas mot varandra.

## Trefas strömsystem

Strömmen i ett symmetriskt trefassystem består av tre strömkomponenter, fasströmmar, som har en inbördes fasskillnad på  $2\pi/3$  radianer (120 grader). Faserna kallas här R, S och T och motsvarande strömeffektivvärden betecknas  $I_R$ ,  $I_S$  och  $I_T$ . Toppvärdesströmmarna blir  $I_R\sqrt{2}$ ,  $I_S\sqrt{2}$  och  $I_T\sqrt{2}$ . Strömeffektivvärdets belopp är detsamma för alla faserna och betecknas  $I$ .

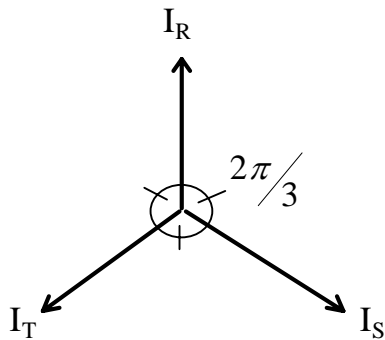


Fig 4. Symmetriskt trefas strömsystem

Definiera:

$$I_R\sqrt{2} = I\sqrt{2} \sin(\omega t) = I\sqrt{2} \frac{e^{j\omega t} - e^{-j\omega t}}{2j}$$

$$I_S\sqrt{2} = I\sqrt{2} \sin(\omega t + 2\pi/3) = I\sqrt{2} \frac{e^{(j\omega t + 2\pi/3)} - e^{-(j\omega t + 2\pi/3)}}{2j}$$

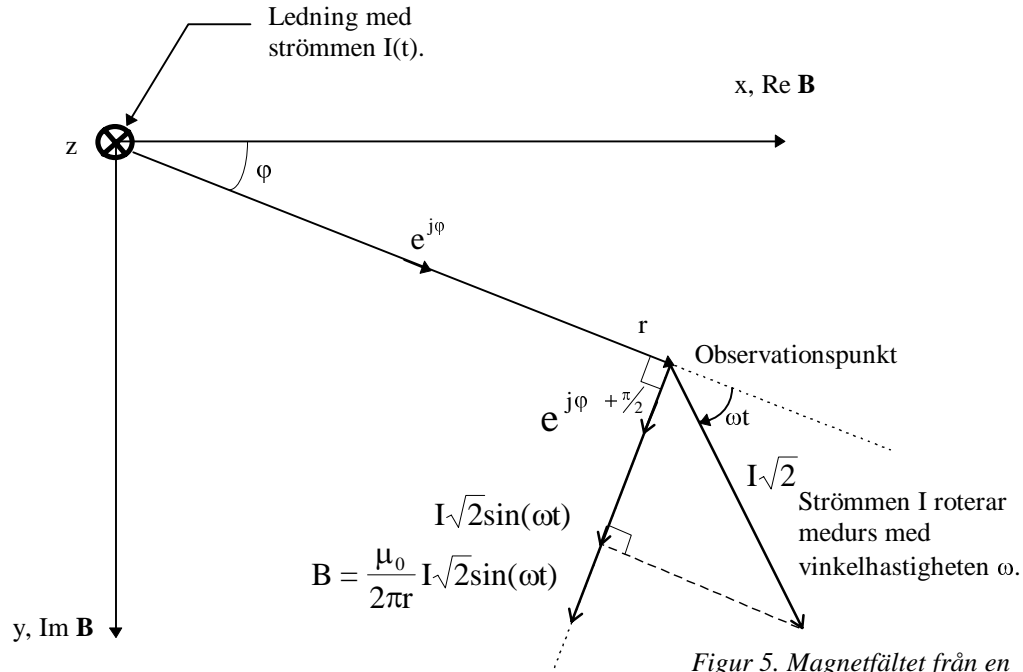
$$I_T\sqrt{2} = I\sqrt{2} \sin(\omega t - 2\pi/3) = I\sqrt{2} \frac{e^{(j\omega t - 2\pi/3)} - e^{-(j\omega t - 2\pi/3)}}{2j}$$

## Magnetfält från ett trefassystem

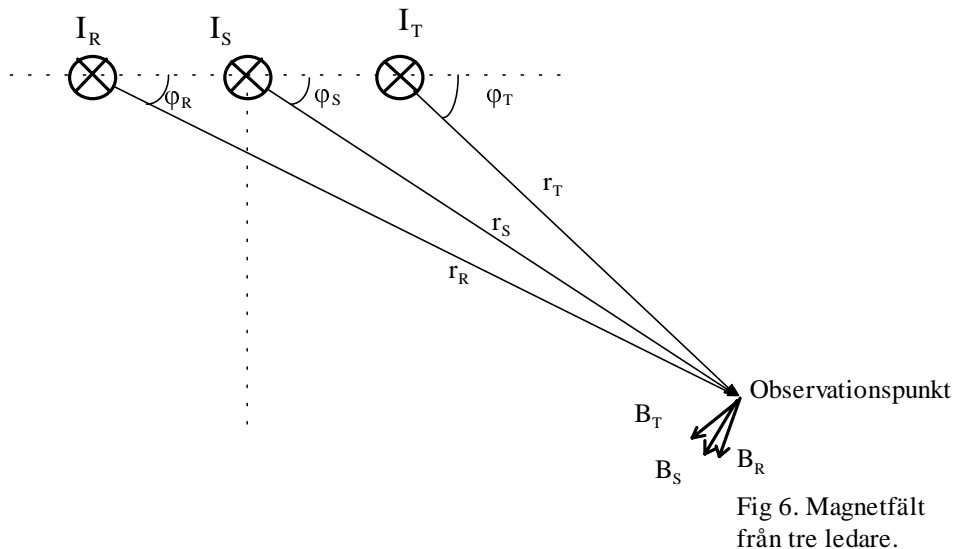
Ett 50 Hz trefassystem kan ur B-fältsynpunkt ses som kvasistationärt (Olsen och Wong 1992). Det innebär att ett statiskt magnetfält kan beräknas och sedan kan detta fält variera som funktion av strömmens amplitud och frekvens, de tidsberoende strömuttrycken kan sättas in direkt i formeln för statiska magnetfält.

Detta kan även tolkas grafiskt. Betrakta en ledare som för en ström  $I\sqrt{2} \sin \omega t$ . Tidsvariationen i systemet kan vektoriellt representeras med en vektor längden  $I\sqrt{2}$  som roterar kring

observationspunkten med vinkelhastigheten  $\omega t$ . Inför ett komplext system med imaginäraxeln parallell med y-axeln och realaxeln parallell med x-axeln. Enhetsvektorn  $\bar{e}_r$  kan då skrivas som  $e^{j\varphi}$  och enhetsvektorn  $\bar{e}_\varphi$  som  $e^{j(\varphi+\pi/2)}$ . Det komplexa magnetfältets toppvärde,  $B$ , fås som projektionen av den roterande  $I$ -vektorn på vektorn  $e^{j\varphi+\pi/2}$  multiplicerat med faktorn  $\frac{\mu_0}{2\pi r}$ .  $B$  kan tolkas som ett komplext tal med beloppet  $\frac{\mu_0}{2\pi r} I\sqrt{2} \sin \omega t$  och argumentet  $e^{j\varphi+\pi/2}$ .



Med ovanstående resonemang applicerat på ett trefassystem fås (Henning, 1992):



$$\bar{B}_R = \frac{\mu_0 I_R \sqrt{2}}{2\pi r_R} \bar{e}_{\varphi_R} = \frac{\mu_0}{2\pi r_R} I \sqrt{2} \frac{e^{j\omega t} - e^{-j\omega t}}{2j} \bar{e}_{\varphi_R} \Rightarrow \{\text{Övergå till komplex notation}\} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow B_R = \frac{\mu_0 I \sqrt{2}}{2\pi r_R} e^{j(\varphi_R + \frac{\pi}{2})} \frac{e^{j\omega t} - e^{-j\omega t}}{2j}$$

På samma sätt fås komplexa magnetfältet för de övriga faserna:

$$B_S = \frac{\mu_0 I \sqrt{2}}{2\pi r_S} e^{j(\varphi_S + \frac{\pi}{2})} \frac{e^{j(\omega t + 2\pi/3)} - e^{-j(\omega t + 2\pi/3)}}{2j}$$

$$B_T = \frac{\mu_0 I \sqrt{2}}{2\pi r_T} e^{j(\varphi_T + \frac{\pi}{2})} \frac{e^{j(\omega t - 2\pi/3)} - e^{-j(\omega t - 2\pi/3)}}{2j}$$

Dela upp magnetfälten från varje fas i en positiv och en negativ rotationsriktning, d.v.s. separera faktorerna  $e^{j\omega t}$  (positiv rotationsriktning) och  $e^{-j\omega t}$  (negativ rotationsriktning). Notera att  $j = e^{j\frac{\pi}{2}}$  samt att  $-1 = e^{j\pi}$  och utnyttja att  $\frac{\mu_0}{4\pi} = 10^{-7} = \frac{1}{10} 10^{-6}$  så att magnetfältet får enheten  $\mu T$  (mikroTesla).

$$B_R = \frac{I\sqrt{2}}{10r_R} [e^{j\omega t} e^{j\varphi_R} + e^{-j\omega t} e^{j(\varphi_R + \pi)}] \mu T$$

$$B_S = \frac{I\sqrt{2}}{10r_S} [e^{j\omega t} e^{j(\varphi_S + 2\pi/3)} + e^{-j\omega t} e^{j(\varphi_S + \pi/3)}] \mu T$$

$$B_T = \frac{I\sqrt{2}}{10r_T} [e^{j\omega t} e^{j(\varphi_T - 2\pi/3)} + e^{-j\omega t} e^{j(\varphi_T - \pi/3)}] \mu T$$

Summera fasbidragen:

$$B = B_R + B_S + B_T = \frac{I\sqrt{2}}{10} e^{j\omega t} \left[ \frac{e^{j\varphi_R}}{r_R} + \frac{e^{j(\varphi_S + 2\pi/3)}}{r_S} + \frac{e^{j(\varphi_T - 2\pi/3)}}{r_T} \right] + \frac{I\sqrt{2}}{10} e^{-j\omega t} \left[ \frac{e^{j(\varphi_R + \pi)}}{r_R} + \frac{e^{j(\varphi_S + \pi/3)}}{r_S} + \frac{e^{j(\varphi_T - \pi/3)}}{r_T} \right] \mu T$$

Sätt:

$$B = B_P e^{j\varphi_P} e^{j\omega t} + B_N e^{j\varphi_N} e^{-j\omega t} \mu T \text{ där } r$$

$$B_P e^{j\varphi_P} = \frac{I\sqrt{2}}{10} \left[ \frac{e^{j\varphi_R}}{r_R} + \frac{e^{j(\varphi_S + 2\pi/3)}}{r_S} + \frac{e^{j(\varphi_T - 2\pi/3)}}{r_T} \right] \text{ och } B_N e^{j\varphi_N} = \frac{I\sqrt{2}}{10} \left[ \frac{e^{j(\varphi_R + \pi)}}{r_R} + \frac{e^{j(\varphi_S + \pi/3)}}{r_S} + \frac{e^{j(\varphi_T - \pi/3)}}{r_T} \right] \mu T$$

$B_P e^{j\varphi_P}$  och  $B_N e^{j\varphi_N}$  är två komplexa vektorer med konstant belopp och argument. De roterar i positiv respektive negativ riktning kring observationspunkten med vinkelhastigheten  $\omega t$  och deras resultantvektor spänner upp en ellips med storaxeln  $B_P + B_N$  och lillaxeln  $|B_P - B_N|$ . Om  $B_P$ 's belopp är större än  $B_N$ 's så är resultantens rotationsriktning positiv, annars negativ. Om beloppen är lika stora så urartar ellipsen till en linje.

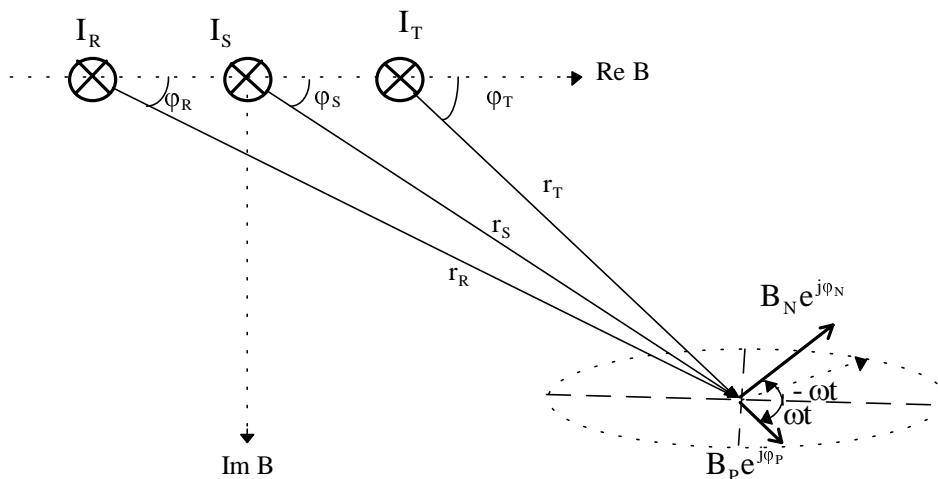


Fig 6. Magnetfält från ett trefassystem.

Ellipsens axelriktningar relativ det komplexa systemet kan fås genom:

Storaxeln:

$B_p$  och  $B_N$  samverkar,  $B = B_p + B_N$

$$\varphi_{\text{StorAxel}} = \varphi_{SA} = \varphi_P + \omega t = \varphi_N - \omega t \Rightarrow \omega t = \frac{\varphi_N - \varphi_P}{2} \Rightarrow \varphi_{SA} = \varphi_P + \frac{\varphi_N - \varphi_P}{2} = \frac{\varphi_N + \varphi_P}{2}$$

Lillaxeln:

$$\varphi_{\text{LillAxel}} = \varphi_{LA} = \varphi_{SA} \pm \frac{\pi}{2} = \frac{\varphi_N + \varphi_P \pm \pi}{2}$$

## Magnetfält från system med mer än tre faser

Tidigare har  $B$  byggts upp av tre bidrag,  $B_R$ ,  $B_S$  och  $B_T$ . Generellt kan dock  $B$  skapas genom addition av ett godtyckligt antal faskomponenter med givna  $r$  och  $\varphi$ .

$$B = \sum_{i=1}^n B_{R_i} + B_{S_i} + B_{T_i} = \sum_{i=1}^n \frac{I\sqrt{2}}{10} e^{j\omega t} \left[ \frac{e^{j\varphi_{R_i}}}{r_{R_i}} + \frac{e^{j(\varphi_{S_i} + 2\pi/3)}}{r_{S_i}} + \frac{e^{j(\varphi_{T_i} - 2\pi/3)}}{r_{T_i}} \right] + \frac{I\sqrt{2}}{10} e^{-j\omega t} \left[ \frac{e^{j(\varphi_{R_i} + \pi)}}{r_{R_i}} + \frac{e^{j(\varphi_{S_i} + \pi/3)}}{r_{S_i}} + \frac{e^{j(\varphi_{T_i} - \pi/3)}}{r_{T_i}} \right] \mu T$$

## Effektivvärdesbildning av magnetfältet

Magnetfältsmätare ger oftast mätresultatet som effektivvärde, och. det är framför allt effektivvärdet som diskuteras i riskbedömningsammanhang.

Effektivvärdet för en komplex variabel  $Z(t)$  beräknas enligt definition som:

$Z_{\text{eff}} = \left[ \frac{1}{T} \int_0^T Z(t)Z(t)^* dt \right]^{1/2}$  där \* står för komplexkonjugering och T är perioden. Magnetfältets

effektivvärde,  $B_{\text{eff}}$ , blir:

$$\begin{aligned} B_{\text{eff}} &= \left[ \frac{1}{T} \int_0^T BB^* dt \right]^{1/2} = \left[ \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (B_P e^{j\varphi_P} e^{j\omega t} + B_N e^{j\varphi_N} e^{-j\omega t}) (B_P e^{j\varphi_P} e^{j\omega t} + B_N e^{j\varphi_N} e^{-j\omega t})^* d(\omega t) \right]^{1/2} = \\ &= \left[ \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (B_P e^{j\varphi_P} e^{j\omega t} + B_N e^{j\varphi_N} e^{-j\omega t}) (B_P e^{-j\varphi_P} e^{-j\omega t} + B_N e^{-j\varphi_N} e^{j\omega t}) d(\omega t) \right]^{1/2} = \\ &= \left[ \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (B_P^2 + B_N^2 + B_P B_N (e^{j(\varphi_P - \varphi_N)} e^{j2\omega t} + e^{j(\varphi_N - \varphi_P)} e^{-j2\omega t})) d(\omega t) \right]^{1/2} = \\ &= \left\{ \int_0^{2\pi} e^{j2\omega t} d(\omega t) = \int_0^{2\pi} e^{-j2\omega t} d(\omega t) = 0 \right\} = \left[ \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (B_P^2 + B_N^2) d(\omega t) \right]^{1/2} = \sqrt{(B_P^2 + B_N^2)} \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} d(\omega t)} = \sqrt{(B_P^2 + B_N^2)} \end{aligned}$$

$B_{\text{eff}}$  är beräkningsmodellens slutresultat.

## Magnetfält från flera ändliga ledningar

För att kunna tillämpa teorin på verkliga kraftledningar behöver man kunna addera bidrag från flera ändliga ledningssegment. Ledningarna kröker och detta kan modelleras som flera raka ändliga ledningar som ligger vinklade i förhållande till varandra.

Det dominerande magnetfältbidraget kommer från den del av ledningen som ligger geografiskt sett närmast observationspunkten. Kalla detta ledningssegmentet för mittledning och de segment som ligger till vänster respektive till höger om ledningen för vänster- respektive höger sidledning. Det totala magnetfältet i observationspunkten kan beräknas genom att de komplexa magnetfältvektorerna  $B_P$  och  $B_N$  från respektive ledningssegment vektoradderas till två vektorer  $B_{P_{\text{tot}}}$  och  $B_{N_{\text{tot}}}$ . som sedan får bilda effektivvärdet. Varje  $B_P$  och  $B_N$  kan delas upp i en vertikal Y-komponent och en horisontell X-komponent, båda komponenterna vinkelräta mot sin ursprungsledning.:

$$B_v = X_v + jY_v \quad (\text{vänster ledningssegment})$$

$$B_m = X_m + jY_m \quad (\text{mittledningen})$$

$$B_h = X_h + jY_h \quad (\text{höger ledningssegment})$$

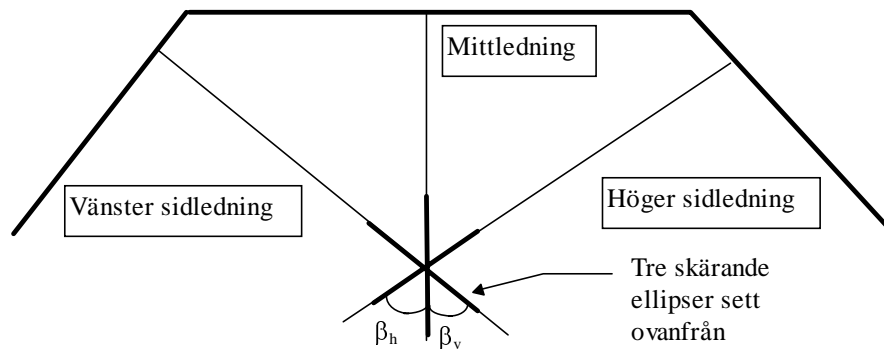
$$X_{\text{tot}} = \sqrt{(X_m + X_v \cos \beta_h + X_h \cos \beta_v)^2 + (X_v \sin \beta_h - X_h \sin \beta_v)^2}$$

$$Y_{\text{tot}} = Y_v + Y_m + Y_h$$

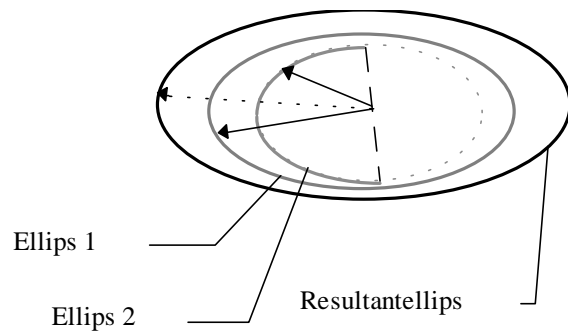
$$B_{\text{tot}} = X_{\text{tot}} + jY_{\text{tot}}$$

Additionen görs för både  $B_P$ - och  $B_N$ vektorerna. Geometriskt kan detta ses som addition av tre vektorer som spänner upp tre ellipser i tre olika plan.  $\beta$  är vinkeln mellan två plan i vilka två

skärande ellipser ligger. Planen skär varandra vid ellipsernas gemensamma mittpunkt och resultatet av additionen blir även det en ellips.



Figur 7. Magnetfält från 3 ledningssegment



Figur 8. Addering av bidrag från flera ledningssegment

## Kartläggning av magnetfält i Stockholm

### Metodval

Det finns olika metoder för att genomföra en magnetfältkartläggning. Antingen kan ett stort antal mätningar utföras och sammanställas eller så kan en beräkningsmodell användas. Mätningar ger enbart information om magnetfältets styrka under själva mätperioden och detta värde kan bara i vissa fall översättas till årsmedelvärde eftersom detta kräver att sambandet mellan ström och magnetfält är känt. Så är endast fallet för ledningssystem bestående av tre ledningar, ej för t.ex. ett system som har sex fasledningar.

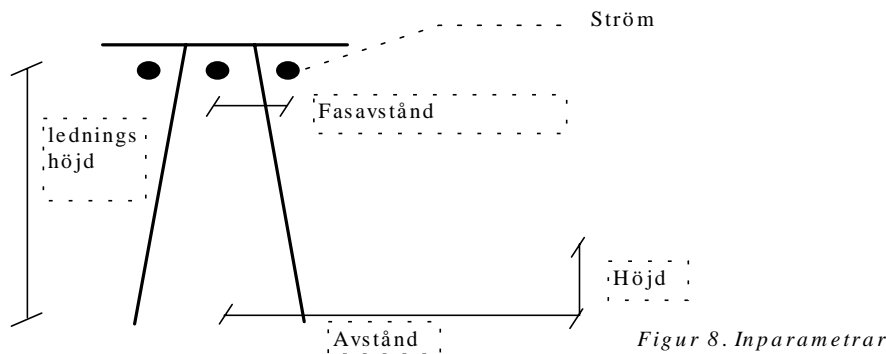
En beräkningsmodell beräknar en magnetfältstyrka som funktion av strömmen i ledningarna och avståndet mellan beräkningspunkten och ledningarna. Kan man mäta upp eller bedöma strömmen som årsmedelvärde kan man via beräkningar få magnetfältstyrkan som årsmedelvärde. Denna kartläggning baseras på beräkningsmodellen som beskrivits tidigare.

Modellen har implementerats som ett datorprogram i Windows-miljö. Modellen arbetar med ändliga, raka ledningssegment som kan ligga vinklade i förhållande till varandra. Genom att kombinera ihop dessa ledningssegment i enlighet med kraftledningarnas konfiguration kan en bra modell av ledningsnätet fås. Modellen visar enbart det magnetfält som härrör från

kraftledningar och tar inte hänsyn till andra magnetfältskällor som t. ex. värmekablar och transformatorstationer.

För att kontrollera modellens riktighet har jämförelser gjorts med liknande modeller hos Vattenfall och Stockholm Energi, och kontrollmätningar har gjorts med magnetfältsmätare. Resultatet av kontrollen visar att modellen stämmer väl överens med verkligheten.

Som inparametrar till modellen ges avståndet till ledningarnas geometriska mittpunkt, önskad beräkningshöjd över marken, ledningshöjd, fasavstånd och fasström.



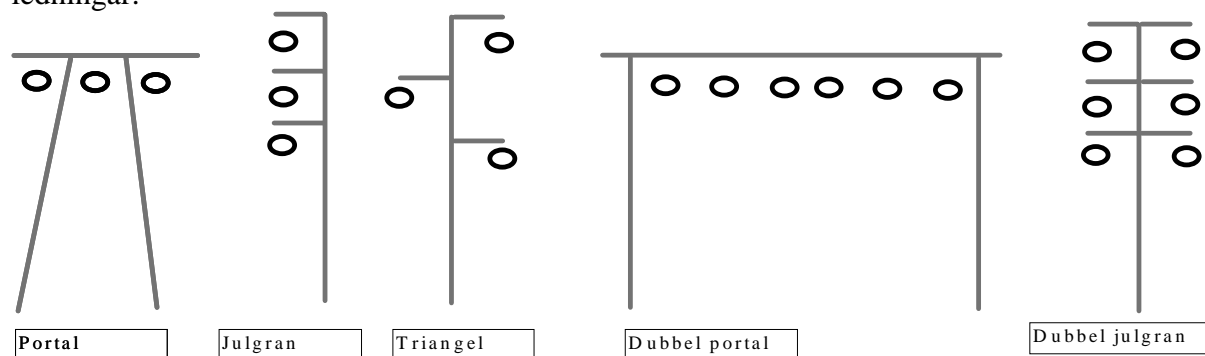
Figur 8. Inparametrar

De två förstnämnda inparametrarna, avstånd och höjd varieras efter behov för att ge magnetfältet i önskad punkt. Övriga parametrar, ledningshöjd, fasavstånd och fasström anpassas efter kraftledningarnas utseende och aktuell ström (belastning) i nätet. Dessa uppgifter fås från berörda kraftbolag. Om ledningen delas upp i flera ledningssegment så ges även segmentens horisontella längd och vinklarna mellan segmenten som inparametrar.

## Kraftledningsnätet i Stockholms kommun

Kraftledningsnätet i Stockholms kommun handhas av Stockholm Energi, Vattenfall och Svenska Kraftnät. Spänningarna för ledningarna är 70 kV eller 220kV och strömmen varierar vanligen mellan 10 - 1000 A. Eftersom det är strömmen och inte spänningen som alstrar magnetfälten så har spänningsstorleken ingen betydelse för magnetfältberäkning.

Det finns ett antal vanligt förekommande ledningskonfigurationer i Stockholm. Dessa är portalledning, julgransledning och triangelledning. De flesta stolparna bär upp tre ledningar, men portalledningar och julgransledning förkommer även dubbelt, dvs en stolpe bär sex ledningar.



Figur 9. Vanliga stolptyper



I tabellen nedan redovisas kraftledningar som finns inom Stockholms kommun. De strömvärden som redovisas är bedömda årsmedelvärden som sammanställts av Svenska Kraftnät. Strömårsmedelvärdena bedöms ha en onoggrannhet på +/- 25 %. I de fall flera strömvärden förekommer består ledningssystemet av fler än tre ledningar.

| <b>Ledningsnamn</b>                 | <b>Typ</b>                   | <b>Kraftbolag</b>               | <b>Geografisk utsträckning</b>   | <b>Ström [A]<br/>Årsmedel-<br/>värde 1994</b> |
|-------------------------------------|------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|---|
| KL12 S3-4                           | portal                       | Stockholm Energi                | Beckomberga västerut             | 166   |
| KL22 , KL24 S1                      | 2 portaler                   | Stockholm Energi                | Ulvsundavägen-<br>Rinkebydalen   | 47, 300                                       |
| KL22 , KL24 S1                      | dubbel<br>portal             | Stockholm Energi                | Beckomberga-<br>Bromstensvägen   | 47, 300                                       |
| KL22 , KL24 S1                      | dubbel<br>julgran            | Stockholm Energi                | Bromstensvägen-<br>Ulvsundavägen | 47, 300                                       |
| KL22 , ÄL5S8                        | 2 portaler                   | Stockholm Energi,<br>Vattenfall | Järvafältet                      | 47, 98  |
| KL22                                | portal                       | Stockholm Energi                | Ulvsundavägen-Rinkeby            | 47  |
| KL22                                | triangel                     | Stockholm Energi                | kring Rinkeby                    | 47  |
| KL23 S1-2<br>RL55 S3-4<br>RL14 S3-4 | dubbel<br>julgran,<br>portal | Svenska kraftnät                | Högdalen söderut                 | 120<br>190<br>480                             |
| KL24 S1                             | portal                       | Stockholm Energi                | Rinkebydalen                     | 300   |
| KL24 S2                             | portal                       | Stockholm Energi                | Beckomberga-Bredäng              | 490   |
| KL24 S3-4                           | portal                       | Stockholm Energi                | Bredäng-Älvsjö                   | 431   |
| KL24 S5-6<br>RL9 S1-2               | dubbel<br>julgran            | Stockholm Energi                | Skanstull-Bolidenplan            | 287<br>23                                     |
| KL24 S5-6                           | portal                       | Stockholm Energi                | Älvsjö-Bolidenplan               | 287   |
| KL25 S1-2<br>KL21 S5-6              | dubbel<br>julgran            | Stockholm Energi                | Värtan norrut                    | 423<br>269                                    |
| RL12 S3-4                           | julgran                      | Svenska kraftnät                | Bredäng söderut                  | 207   |
| RL14 S1-2<br>RL9 S3                 | dubbel<br>portal             | Svenska kraftnät                | Högdalen-Skarpnäck               | 190<br>210                                    |
| RL14 S1-2<br>RL9 S3                 | dubbel<br>julgran            | Svenska kraftnät                | Skarpnäck österut                | 190<br>210                                    |
| RL15<br>RL17                        | dubbel<br>julgran            | Svenska kraftnät                | längs E4 Kista/Akalla            | 376<br>376                                    |
| RL9 S1-2                            | julgran                      | Stockholm Energi                | Bolidenplan-Örbyleden            | 23  |
| RL9 S1-2                            | portal                       | Stockholm Energi                | Huddingevägen-<br>Högdalen       | 23  |
| ÄL5 S8                              | portal                       | Vattenfall                      | Inre Tvärleden-<br>Järvafältet   | 98  |
| ÄL59 S3                             | portal                       | Vattenfall                      | Älvsjö söderut                   | 346   |
| ÄL85 S2-3                           | portal                       | Vattenfall                      | Skrubba                          | 128   |
| ÄL9 S8                              | portal                       | Vattenfall                      | Sånga-Viksjö                     | 0 (reserv-<br>ledning)                        |

## **Bedömningsgrunder för magnetfält**

Enligt Statens Strålskyddsinstitut (SSI 1993) pekar vissa forskningsresultat mot att det finns ett samband mellan en del cancerformer och exponering för den typ av lågfrekventa magnetfält som förekommer intill kraftledningar, elektrisk utrustning m.m. Trots att osäkerheten är stor om dessa eventuella samband kan det enligt SSI vara motiverat att vidta skyddsåtgärder som innebär att man:

- Vid dragning av nya kraftledningar och nyinstallationer av utrustningar som kan medföra höga exponeringar för magnetfält bör söka efter lösningar som ger låga exponeringar om dessa inte innebär stora olägenheter eller kostnader.

- minskar exponeringar som mer än tiotals gånger överstiger normalvärden för magnetiska fält (0.05 - 0.10  $\mu\text{T}$ ) när detta kan ske till rimliga kostnader. Man kan dock avvakta med kostsamma ombyggnader av befintliga installationer om exponeringarna uppgår till högst några tiotals gånger normalvärdena.

Miljöförvaltningen har som planeringsmål satt 0.2  $\mu\text{T}$  som långtidsmedelvärde för högsta magnetfältsexponering.

Minsta avstånd mellan kraftledning och bebyggelse är av elsäkerhetsskäl satt till 10 m.

## **Resultat av kartläggningen**

Kartläggningen baseras på det årsmedelvärde av kraftledningsströmmar som bedömts för 1994 vilket innebär att nedan redovisade magnetfältsvärden skall ses som årsmedelvärden för 1994. Att årsmedelvärden och inte maxvärden redovisas beror på att det är troligt att en långvarig exponering för magnetfält krävs för att eventuella hälsorisker skall kunna uppkomma.

Samtliga magnetfältsnivåer är beräknade 1.5 m över marknivån. På andra höjder blir magnetfältet något annorlunda. Skillnaden är dock marginell, främst på längre avstånd (> 30 m) från ledningen.

I tabellen nedan redovisas de horisontella avstånd från kraftledningarnas närmaste fasledning där magnetfältets årsmedelvärde är 0.1, 0.2 respektive 1  $\mu\text{T}$ . Om inget värde redovisas beror det på att magnetfältet är lägre än rubrikens värde oavsett avstånd från kraftledningen. Avstånden är beräknade för oändligt långa raka ledare, vilket är en bra approximation för större delen av ledningsnätet. Om ledningen kröker blir avstånden något annorlunda vid beräkning i närheten av ledningskröken.

Osäkerheten +/- 25 % i strömårsmedelvärdena innebär en osäkerhet på cirka +/- 13 % i nedan redovisade avstånd.

0.1  $\mu\text{T}$  är SSI's bedömning av ett normalvärde (bakgrundsvärde) för kraftfrekventa magnetfält.

0.2  $\mu\text{T}$  är Miljöförvaltningens planeringsmål.

1  $\mu\text{T}$  är 10 ggr SSI's normalvärde.

| Ledningsnamn                        | Geografisk utsträckning             | 0.1 $\mu$ T<br>avstånd [m] | 0.2 $\mu$ T<br>avstånd [m] | 1 $\mu$ T avstånd<br>[m] |
|-------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------|
| KL12 S3-4                           | Beckomberga västerut                | 58                         | 38                         | 12                       |
| KL22 , KL24 S1                      | Ulvsundavägen runt<br>Rissne        | väster: 71<br>öster: 85    | väster: 43<br>öster: 57    | väster: 6<br>öster: 20   |
| KL22 , KL24 S1                      | Bromstenvägen-<br>Beckomberga       | norr: 63<br>söder: 77      | norr: 38<br>söder: 52      | norr: 2<br>söder: 17     |
| KL22 , KL24 S1                      | Ulvsundaleden till<br>Bromstenvägen | väster: 60<br>öster: 68    | väster: 35<br>öster: 43    | väster: -<br>öster: -    |
| KL22 , ÄL5S8                        | Akalla-Rinkeby                      | väster: 35<br>öster: 35    | väster: 21<br>öster: 20    | väster: -<br>öster: -    |
| KL22                                | Bromsten-Rinkeby                    | 27                         | 16                         | -                        |
| KL22                                | runt Rinkeby                        | väster: 21<br>öster: 22    | väster: 7<br>öster: 8      | väster: -<br>öster: -    |
| KL23 S1-2<br>RL55 S3-4<br>RL14 S3-4 | Högdalen söderut                    | väster: 99<br>öster: 93    | väster: 67<br>öster: 60    | väster: 25<br>öster: 13  |
| KL24 S1                             | Rissne-Enköpingsvägen               | 81                         | 55                         | 19                       |
| KL24 S2                             | Beckomberga söderut                 | 105                        | 72                         | 27                       |
| KL24 S3-4                           | Bredäng-Älvsjö                      | 98                         | 67                         | 25                       |
| KL24 S5-6                           | Älvsjö-Bolidenplan                  | 79                         | 53                         | 19                       |
| KL24 S5-6<br>RL9 S1-2               | Bolidenplan-Skanstull               | norr: 71<br>söder: 61      | norr: 48<br>söder: 37      | norr: 10<br>söder: -     |
| KL25 S1-2<br>KL21 S5-6              | Värtan norrut                       | väster: 53<br>öster: 27    | väster: 34<br>öster: 17    | väster: -<br>öster: -    |
| RL12 S3-4                           | Bredäng söderut                     | 75                         | 49                         | -                        |
| RL14 S1-2<br>RL9 S3                 | Högdalen-Skarpnäck                  | norr: 64<br>söder: 65      | norr: 42<br>söder: 43      | norr: 13<br>söder: 13    |
| RL14 S1-2<br>RL9 S3                 | Skarpnäck österut                   | norr: 85<br>söder: 85      | norr: 57<br>söder: 57      | norr: 15<br>söder: 16    |
| RL15<br>RL17                        | Tureberg-Järva                      | 119                        | 82                         | 27                       |
| RL9 S1-2                            | Bolidenplan-Örbyleden               | 14                         | -                          | -                        |
| RL9 S1-2                            | Örbyleden-Högdalen                  | 16                         | 7                          | -                        |
| ÄL5 S8                              | Hallonbergen-Rinkeby                | 30                         | 19                         | -                        |
| ÄL59 S3                             | Kring Mässan                        | 60                         | 38                         | -                        |
| ÄL59 S3                             | Älvsjö söderut                      | 65                         | 44                         | 16                       |
| ÄL85 S2-3                           | Skrubba                             | 37                         | 24                         | 4                        |
| ÄL9 S8                              | Sånga-Viksjö                        | -                          | -                          | -                        |

Tabell 2. Horisontella avstånd från kraftledningarnas närmaste fasledning där magnetfältets årsmedelvärde är 0.1, 0.2 respektive 1  $\mu$ T.

Prognoser av framtida strömstyrkor i ledningsnätet visar att en strömökning är att vänta i de flesta ledningarna. För år 2000 visar prognosen på en strömökning med 5-35%. Detta innebär att avstånden i tabellen kan väntas öka med 1 - 10 meter i framtiden.

Bilaga A visar en översikt av kraftledningar i Stockholm.

Bilaga B visar magnetfältets årsmedelvärde som funktion av avståndet från kraftledningsmittpunkten för ledningarna i Stockholm. Negativt avstånd är avstånd i sydlig eller västlig riktning och positivt avstånd är avstånd i nordlig eller östlig riktning. Beräkningarna är gjorda för oändligt långa raka ledare. Om ledningen kröker blir kurvorna något annorlunda.

Bilaga C visar på kartor de områden kring kraftledningar där magnetfältets årsmedelvärde överstiger  $0.2 \mu\text{T}$ , dvs de områden där magnetfältet överstiger Miljöförvaltningens planeringsmål. Beräkningarna är gjorda utifrån ledningsnätets utsträckning, dvs hänsyn är tagen till att ledningarna kröker.

## Slutsatser

Kartläggningen visar att det finns byggnader och rekreationsområden som ligger i områden där magnetiska fältstyrkan överstiger Miljöförvaltningens planeringsmål  $0.2 \mu\text{T}$ . Områdena är dock relativt begränsade och ligger alltid i nära anslutning till kraftledningarna. Kartläggningen är dock som tidigare nämnts översiktlig, och det finns anledning att göra detaljstudier i fall där man vill bestämma magnetfältsnivån för en viss mätpunkt. Detaljstudier kan göras med beräkningsprogrammet som använts för kartläggningen och/eller mätningar. Generellt kan dock sägas att på ett avstånd  $> 90$  m från en kraftledning i Stockholms kommun överskrids ej Miljöförvaltningens planeringsmål som årsmedelvärde.

## Referenser och litteraturförteckningar

CHENG, D. K. 1989. *Field and Wave Electromagnetics*. Addison-Wesley

ERIKSSON, R. 1991. *Elektroteknisk konstruktion ak*. Elkraftcentrum, KTH.

FEYCHTING, M. AHLBOM, A. 1992. *Cancer och magnetfält hos bosatta nära högspänningsledningar i Sverige*. IMM-rapport 5/92. Institutet för miljömedicin, Karolinska institutet.

GUSTAVSON, F. m.fl. 1990. *Kompendium i elkraftteknik*. Institutionen för elektriska maskiner och kraftelektronik, KTH.

HENNING, G. 1992. *Magnetfält från trefasledning*. Teknik och miljö, Stockholm Energi.

HENNING, G. 1993. *Mätning av magnetfält från 220 kV luftledningar i Stockholm och Solna*. Teknik och miljö, Stockholm Energi.

OLSEN, R. G. WONG, P. S. 1992. *Characteristics of low frequency electric and magnetic fields in the vicinity of electric power lines*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, No. 43, s. 2046-2055.

OLSEN, R. G. DENO, D. BAISHIKI, R. S. 1988. *Magnetic fields from electric power lines, Theory and comparison to measurements*. IEEE Magnetic Fields Task Force of the AC Fields Working Group of the Corona and Field Effects Subcommittee of the transmission and Distribution Committee.

OLSEN, R. G. CHARTIER, V. L. 1993. *The performance fo reduced magnetic field power lines. Theory and measurementrs on an operating line*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, No. 3, s. 1430-1442.

PETTERSON, P. *Simple method for characterization of magnetic fields from balanced three-phase systems*. Vattenfall utveckling AB

*Elektriska och magnetiska fält från 50 Hz elkraft. Vad vet vi om möjliga skaderisker?* SSI/IJS 1993, Statens Strålskyddsinstitut

*Transmission line reference book 345 KV and above*. s 341-343.

WALTRÉ, M. 1987. *Miljöparameterstudie för 400 kV tätortsledning*. Vattenfall.