

# **EMF-forskning 1993-2003**

**Elforsk rapport 05:10**



# **EMF-forskning 1993-2003**

**Elforsk rapport 05:10**



# **EMF-forskning 1993-2003**

## **Elforsk rapport 05:10**

Petra Lundberg och Rolf Lindgren, SwedPower AB





## Förord

Elforsk har drivit verksamhet inom området elektriska och magnetiska fält (EMF) sedan 1990-talet. Verksamheten omfattade från början omvärldsbevakning, biologiska studier kring EMF och cancer, exponeringskaraktistik samt tekniska åtgärder för att minska fälten. Inriktningen kom därefter att förändras på ett sätt som innebar att den biologiska forskningen och exponeringskaraktistiken minskade i omfattning. Bakgrunden till detta var dels avsaknaden av hypotes om hur EMF skulle kunna orsaka cancer och dels att de biologiska studier som visat på ett samband inte hade kunnat upprepas. Programmet kom därmed att inriktas mot omvärldsbevakning och tillämpningar av den så kallade försiktighetsprincipen omfattande bl.a. åtgärder för fältreduktion.

Omvärldsbevakningen har varit en viktig del av verksamheten sedan programverksamheten startade och för att få en uppfattning om kunskapsutvecklingen under perioden 1993-2003 har Elforsk uppdragit åt Swedpower att ta fram föreliggande syntesrapport. Syftet har varit att identifiera områden och frågeställningar där:

- ökad klarhet har nåtts och där forskningsresultaten kan vara av potentiell betydelse för branschen
- ingen vetenskaplig konsensus finns men där fortsatt bevakning kan vara nödvändig
- forskningen av olika skäl avklingat och där ingen vidare bevakning behöver göras

Arbetet har initierats och granskats av Svensk Energis EMF-grupp bestående av:

Eva Bergius (ordförande), Svenska Kraftnät

Helena Andersson (sekreterare), Svensk Energi

Lennart Engström, Vattenfall Eldistribution

Jenny Gode, Elforsk

Bengt Hanell, Elforsk

Gunnar Hovsenius, Elforsk

Bengt Marthinsson, Sydkraft

Åke Sjödin, Elforsk

Henry Söderman, Fortum Distribution

Ulf Thorén, Sydkraft Nät

Marianne Windell, Vattenfall Eldistribution

De företag som bidragit till finansieringen av projektet är: C4 Elnät, Eskilstuna Energi och Miljö, Fortum Eldistribution, Grangö Nät, Göteborg Energi, Holmen Kraft, Jämtkraft, Lulekraft, Mälarenergi, Skellefteå Kraft, Svenska Kraftnät, Sydkraft Nät, Sydkraft, Umeå Energi, Vattenfall, Vattenfall Eldistribution, Vattenfall Elproduktion, Växjö Energi Elnät och Öresundskraft.

Stockholm september 2005

Jenny Gode

Elforsk AB

Programområde Överföring och distribution



## Sammanfattning

Föreliggande rapport sammanfattar 10 års forskning inom kraftfrekventa elektriska och magnetiska fält.

Cancer är den problemställning som varit föremål för mest forskning under den gångna 10-årsperioden. Ett flertal epidemiologiska studier har visat statistiska samband mellan långtidsexponering för magnetfält och ett fåtal cancerformer. Det tydligaste sambandet gäller barnleukemi och magnetfält från kraftledningar. Sambanden antyder dock så små riskökningar att det även krävs bevis från experimentella studier och en trovärdig mekanism för att ett orsakssamband kan anses föreligga. I detta fall saknas både bevis från experimentella studier och en trovärdig mekanism. Det finns även resultat från stora och väl genomförda studier som inte visat några samband.

Ett antal hälsoundersökningar och epidemiologiska studier antyder samband mellan EMF och kognitiva funktioner samt diffusa centralnervösa symptom. Resultaten visar på överensstämmelse med hypotesen att magnetfälten utövar en kronisk stresseffekt på det centrala nervsystemet. Ett relativt starkt samband har visats mellan amyotrofisk lateralskleros (ALS) och elarbete, men EMF är bara en av flera tänkbara förklaringar. Motsvarande, fast svagare samband, är även visat för Alzheimers sjukdom.

Från reproduktionsområdet kan konstateras att kraftfrekventa elektriska eller magnetiska fält av normalt förekommande styrkor, inte medför några fosterskadande effekter eller någon annan negativ påverkan på fortplantningen hos människor och djur.

Ett potentiellt viktigt område är påverkan på immunsystemet hos människor och djur. Speciellt noteras att magnetfältsexponering kan ha en akut aktiverande inverkan på immunsystemet medan långvarig exponering tycks utarma kroppens förmåga till immunförsvar.

Forskningen på området fältvariabler och därtill kopplade mekanismer visar att intermittenta magnetfält har en större biologisk verkan än kontinuerliga. En annan iakttagelse är att biologiska effekter ofta uppträder som fönstereffekter i amplitud, frekvens, ibland även i tid.

Efter mer än 20 års intensiv forskning kring eventuella hälsoeffekter av kraftfrekventa elektriska och magnetiska fält börjar nu hälsoriskfrågan återgå till högfrekvensområdet, speciellt till mobiltelefonfrekvenserna.



## Summary

This report summarises 10 years of research on power frequent electric and magnetic fields.

Cancer is the topic for which most research has been carried out during the 10-year-period. Epidemiological studies have shown statistical correlations between long time exposure to magnetic fields and a few forms of cancer. The most obvious correlation is between childhood leukaemia and magnetic fields from power lines. However, the correlations correspond to very small increases in risk and since there is no experimental evidence and no trustworthy mechanism exists, a cause-and-effect relationship cannot be established. Furthermore, there are also comprehensive and well-performed studies which show no correlations.

Some studies indicate a correlation between electric and magnetic fields and cognitive functions and diffuse central nervous symptoms. The results show correspondence with the hypothesis that magnetic fields cause a chronic stress effect to the central nervous system. A relatively strong correlation has been shown between ALS (amyotrophic lateral sclerosis) and electricity related labour. EMF is however only one of several conceivable explanations. An equivalent, although weaker, correlation has also been shown for Alzheimer's disease.

It can be stated that frequent electric and magnetic fields do not seem to have any influence on reproducibility, such as damage on the foetus or negative effects on the reproduction in humans or animals.

A potentially important area is the effect on the immune system in humans and animals. In fact, it has been noted that magnetic fields may activate the immune system whilst long term exposure seems to impoverish the capacity of the immune system.

The research on field variables and connected mechanisms shows that intermittent magnetic fields have stronger biological impact than continuous fields. Another observation is that biological effects often appear as window effects in amplitude, frequency and sometimes even in time.

After more than 20 years of intensive research in the area of power frequent magnetic fields and cancer, the interest is again turned towards the high frequency area and potential health effects, especially from mobile telephones.



## Innehållsförteckning

|                   |                                                                    |           |
|-------------------|--------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b>          | <b>INLEDNING .....</b>                                             | <b>3</b>  |
| 1.1               | BAKGRUND .....                                                     | 3         |
| 1.2               | MÅL.....                                                           | 4         |
| 1.3               | AVGRÄNSNINGAR .....                                                | 4         |
| <b>2</b>          | <b>FÄLTKARAKTÄRISTIK OCH EXPONERING .....</b>                      | <b>5</b>  |
| <b>3</b>          | <b>CELL- OCH MOLEKYLÄRBIOLOGISKA STUDIER .....</b>                 | <b>7</b>  |
| 3.1               | JONRESONANS .....                                                  | 7         |
| 3.2               | KALCIUMEFFEKTER.....                                               | 7         |
| 3.3               | GENETISKA EFFEKTER .....                                           | 8         |
| 3.4               | MAGNETITMEKANISMER.....                                            | 8         |
| 3.5               | MELATONINHYPOTSEN.....                                             | 9         |
| 3.6               | FRIA RADIKALER .....                                               | 9         |
| 3.7               | CANCERPROMOTION, ENZYMER, APOPTOS, PÅVERKAN PÅ IMMUNSYSTEMET ..... | 9         |
| 3.8               | SLUTSATSER – CELL- OCH MOLEKYLÄRBIOLOGISKA STUDIER.....            | 10        |
| <b>4</b>          | <b>DJURSTUDIER .....</b>                                           | <b>11</b> |
| 4.1               | EFFEKTER PÅ NERVSISTEEMET .....                                    | 11        |
| 4.2               | REPRODUKTION OCH FOSTERUTVECKLING .....                            | 11        |
| 4.3               | MELATONINEFFEKTER .....                                            | 11        |
| 4.4               | IMMUNOLOGISKA EFFEKTER.....                                        | 12        |
| 4.5               | DNA-SKADOR, FRIA RADIKALER .....                                   | 12        |
| 4.6               | CANCER .....                                                       | 12        |
| 4.7               | SLUTSATSER – DJURSTUDIER.....                                      | 12        |
| <b>5</b>          | <b>STUDIER PÅ MÄNNISKA .....</b>                                   | <b>14</b> |
| 5.1               | EFFEKTER PÅ NERVSISTEEMET .....                                    | 14        |
| 5.2               | REPRODUKTION .....                                                 | 15        |
| 5.3               | MELATONINEFFEKTER, SÖMNBESVÅR .....                                | 16        |
| 5.4               | DEPRESSION .....                                                   | 17        |
| 5.5               | HJÄRT-KÄRLSYSTEMET.....                                            | 17        |
| 5.6               | IMMUNOLOGISKA EFFEKTER.....                                        | 17        |
| 5.7               | KROMOSOMSKADOR .....                                               | 17        |
| 5.8               | CANCER .....                                                       | 18        |
| 5.9               | SLUTSATSER – STUDIER PÅ MÄNNISKA.....                              | 20        |
| <b>6</b>          | <b>SAMMANFATTANDE SLUTSATSER .....</b>                             | <b>22</b> |
| 6.1               | CANCER .....                                                       | 22        |
| 6.2               | EFFEKTER PÅ NERVSISTEEMET .....                                    | 22        |
| 6.3               | REPRODUKTION OCH FOSTERUTVECKLING .....                            | 23        |
| 6.4               | EFFEKTER PÅ IMMUNSYSTEMET .....                                    | 23        |
| 6.5               | FÄLTVARIABLER - MEKANISMER.....                                    | 23        |
| <b>7</b>          | <b>BAKGRUNDSRAPPORTER 1993 - 2003.....</b>                         | <b>24</b> |
| <br><b>Bilaga</b> |                                                                    |           |
|                   | <b>ORDLISTA .....</b>                                              | <b>25</b> |



# 1 Inledning

## 1.1 Bakgrund

Det elektromagnetiska spektret kan indelas i:

1. en lågfrekvent del som sträcker sig upp till en frekvens på  $10^5$  Hz. Inom denna del finns det extremt lågfrekventa (ELF) området, upp till 300 Hz, som är av särskilt intresse för elföretagen.
2. en del som omfattar radio- och mikrovågor, som börjar vid  $10^5$  Hz och nästan sträcker sig upp till  $10^{12}$  Hz.
3. den infraröda och den ultravioletta delen som sträcker sig från strax under  $10^{12}$  Hz upp till  $10^{17}$  Hz. Mellan dessa delar ligger frekvensbandet för synligt ljus,  $5 \cdot 10^{14}$  -  $9 \cdot 10^{14}$  Hz.
4. en del med joniserande strålning som sträcker sig från ungefär  $5 \cdot 10^{15}$  Hz till  $10^{22}$  Hz.

Forskning om biologiska effekter av strålning med frekvenser under  $10^{12}$  Hz och som således inte har något att göra med joniserande strålning har pågått i mer än ett halvsekel. Under de första decennierna var intresset främst knutet till radio-, radar- och mikrovågor, som är tillräckligt energirika för att värma upp biologiskt material. Från 1970-talet och framåt inriktades forskningen mer och mer på effekter av extremt lågfrekventa elektriska och magnetiska fält. Att ELF-fält av tillräcklig styrka kan ge en akut påverkan hos människor och djur är känt sedan länge. Orsakerna till detta är att fälten inducerar elektriska strömmar i vävnaderna.

Kunskaperna om eventuella hälsorisker till följd av långtidsexponering för ELF-fält är inte lika kända som de akuta effekterna (nerv- och muskelreaktioner, elchock, hjärtflimmer etc). Elektriska fält skärmas av jordade föremål och avtar snabbt med avståndet från källan, t ex kraftledningen. Magnetiska fält dämpas däremot inte lika lätt och breder också ut sig på större avstånd. Detta är den huvudsakliga anledningen till att forskningen om biologiska effekter av ELF-fält till stor del fokuserats till magnetfälten. Omfattande forskningsinsatser kom under 1980- och 90-talen till stånd inom detta område och då särskilt för att utreda om det finns några samband mellan exponering för magnetfält och uppkomst av cancer.

Svensk kraftindustri har sedan början av 1980-talet haft speciell bevakning på denna del av EMF-området. Bevakningen och rapporteringen överfördes senare på Elforsk. Den viktigaste kanalen för rapporteringen i Elforsks regi har varit publikationen El- och Magnetfält, vars senaste årgångar finns utlagda på Elforsks hemsida.

I El- och Magnetfält har rapporteringen skett under fyra fasta rubriker:

- ☐ Fältkaraktäristik och exponering
- ☐ Cell- och molekylärbiologiska studier
- ☐ Djurförsök
- ☐ Studier på människa

Arbetet med föreliggande syntesrapport har omfattat genomgång av rapporterna för åren 1993-2003. Rapporteringen har sammanställts och analyserats områdesvis enligt ovan. I det avslutande avsnittet "Sammanfattande slutsatser" beskrivs utvecklingen på olika hälsoeffektsområden i mera sammanhållen form och slutsatser från epidemiologiska studier etc. på människa förs samman med erfarenheter från försök med djur och celler.

## **1.2 Mål**

Ändamålet med denna rapport har varit att göra en syntes av de senaste 10 årens kunskapsutveckling i syfte att identifiera områden och frågeställningar där:

- ökad klarhet har nåtts och där forskningsresultaten kan vara av potentiell betydelse för branschen
- ingen vetenskaplig konsensus finns men där fortsatt bevakning kan vara nödvändig
- forskningen av olika skäl avklingat och där ingen vidare bevakning behöver göras

Målgruppen för denna rapport är i första hand personer i branschen.

## **1.3 Avgränsningar**

I likhet med rapporteringen i årsrapporterna behandlas endast ELF-området, dvs. frekvenser upp till 300 Hz. Vidare har all udda rapportering, som inte hör hemma under någon huvudrubrik, utelämnats.

I rapporten behandlas inte akuta effekter, utan endast eventuella långtidseffekter av EMF-exponering.

## 2 Fältkaraktäristik och exponering

Den forskningsbevakning, som skett genom Elforsk, har under den senaste tioårsperioden främst varit knuten till om exponering för kraftfrekventa magnetiska fält på lång sikt kan ge skador på människan. I många andra sammanhang när det gäller hälsobedömningar uttrycks exponeringen ofta som koncentration eller styrka gånger tid. Dosbegreppet i samband med magnetfältsexponering är inte lika självklart. Magnetfälten är vektorstorheter och karaktäriseras förutom av frekvens och flödestäthet även av polarisation och riktning. Redan under 1980-talet presenterades forskningsresultat som tydde på att de biologiska effekterna inte följde några linjära samband med ökade magnetfältsamplituder, ökad frekvens och längre exponeringstider. I stället noterades s.k. ”fönstereffekter” som indikerade att det inom vissa intervall kunde föreligga någon typ av resonansfenomen där även det naturliga jordmagnetfältet tycktes vara inblandat. Forskning i början av 1990-talet antydde även att flera komponenter som hade med fältets tidsvariation att göra (övertonshalt, förekomst av transienter, intermittens, etc.), kunde spela in.

För att kunna förklara den eventuella uppkomsten av biologiska effekter till följd av magnetfältsexponering ansåg amerikanska forskare i början på 1990-talet att en närmare kännedom om magnetfältens olika komponenter var nödvändig. Ett omfattande forskningsprogram, EMF RAPID, kring fältkaraktärisering påbörjades därför. När programmet avslutades 1998-99 kunde man dessvärre konstatera att satsningen inte lett till någon ökad förståelse. Till detta återkommer denna rapport i avsnittet om Cell- och molekylärbiologiska studier. I anslutning till forskningen inom RAPID-programmet utfördes ett betydande tekniskt utvecklingsarbete av dosimetrar och andra mätinstrument.

Exponeringsmätningar för allmänhet och yrkesgrupper har även gjorts i många andra länder än USA. I Sverige finns numera en ganska klar bild över hur magnetfältsexponeringen ser ut i bostäder, skolor, daghem etc. intill kraftledningar, i tätortsmiljöer med s.k. vagabonderande strömmar (se förklaring i nästa stycke) och i bostadsmiljöer i allmänhet. Mätningarna visar att magnetfält av storleksordningen 0,05-0,1 mikrot Tesla ( $\mu\text{T}$ ) finns i de flesta bostadsmiljöer men kan vara en 10-potens högre i miljöer där vagabonderande strömmar förekommer. Magnetfälten i stadsmiljöer skiljer sig inte storleksmässigt från de som förekommer invid kraftledningar.

I ett elsystem med fyra ledare, som är det normala i det svenska fastighetsbeståndet, finns det förutsättning för strömmen att ta en annan väg tillbaka från lasten till transformatorn än genom kabelns PEN-ledare (med sammankopplad skyddsjord och nolledare). En sådan möjlighet är vattenledningsrör, som ofta har en lägre resistans än PEN-ledaren. Detta brukar man kalla en vagabonderande ström. Den är inte i sig farlig men alstrar ett magnetfält som kan ha samma styrka som fälten kring kraftledningar.

Den internationella kommissionen för skydd mot icke-joniserande strålning, ICNIRP, utger översikter av hälsoeffekter av icke-joniserande strålning och tar fram vetenskapligt underlag för rekommendationer och gränsvärden. Kommissionens senaste riktlinjer är från 1998 och gäller akuteffekter av typen nerv- och muskelreaktioner, elchock

i samband med kontaktströmmar samt energiabsorption i vävnader till följd av EMF-exponering. Riktlinjerna omfattar såväl allmänhetens exponering som exponering i yrkeslivet. Riktlinjerna anges på två sätt:

- dels som "grundläggande begränsningar" för högsta tillåtna strömtätheter i kroppen
- dels som "referensnivåer" för yttre elektriska och magnetiska fält, som skall säkerställa att de grundläggande begränsningarna inte överskrids.

Om de uppmätta elektriska och/eller magnetiska fälten överskrider referensvärdena, innebär detta inte nödvändigtvis att de grundläggande begränsningarna överskrids. Man får i sådana fall göra en särskild undersökning för att säkerställa att begränsningarna innehålls. De senare är, enligt internationella rekommendationer, satta vid ungefär två procent av de nivåer vid vilka akuta biologiska effekter är vetenskapligt säkerställda (50-faldig säkerhet).

Kring ovanstående frågeställningar finns flera oklarheter som behöver redas ut. Exempelvis har olika forskargrupper kommit till olika resultat när de beräknat vilken inducerad ström som uppkommer till följd av olika exponeringar. Orsaken till detta hänger samman med vilka beräkningsmodeller som använts. Ett annat problemområde är hur elektriska fält kan mätas i ostörd miljö. Ytterligare en punkt som kan komma att kräva ytterligare belysning är tillämpningen av EU-direktivet från år 2004 om insatsvärden för elektriska fält i yrkesmiljöer.

### 3 Cell- och molekylärbiologiska studier

Redan 1993 fanns vissa resultat från den experimentella forskningen som antydde att kraftfrekventa elektriska och magnetiska fält, även av relativt måttlig styrka, kunde framkalla biologiska långtidseffekter i celler och vävnader. Det fanns emellertid ingen accepterad teori eller hypotes som kunde förklara hur en sådan påverkan kunde gå till, dvs. vilka som är de bakomliggande mekanismerna. Vissa av de hypoteser som fram-lades grundar sig på att de strömmar som induceras från yttre elektriska och magnetiska fält påverkar elektrokemiska processer lokaliserade till cellmembranet. Strömmarna är dock alldeles för svaga för att kunna ge nervexcitationer eller åstadkomma andra akuta effekter i nerver eller muskler.

Betydande insatser inom cellforskningsområdet drogs i USA igång inom programmet EMF RAPID. Även i Sverige fanns vid början av perioden forskargrupper som var mycket aktiva inom cellforskningen. Stora förhoppningar knöts till en snar lösning av mekanismfrågan. Ett forskningsgenombrott på detta viktiga område skulle inte bara kasta nytt ljus över frågan om tänkbara hälsorisker utan även öppna nya vägar för användning av lågfrekventa magnetfält i olika medicinska behandlingar – det senare en ofta förbisedd men viktig anledning till att man bedriver forskning på EMF-området.

Följande redovisning omfattar sju huvudområden som ingått i de senaste tio årens EMF-rapportering på området cell- och molekylärbiologi.

#### 3.1 Jonresonans

Redan under 1970-talet fann amerikanska forskare i försök på kycklinghjärnor att vissa biologiskt betydelsefulla joner, t ex kalciumjoner  $\text{Ca}^{2+}$ , påverkades i distinkta "fönster" i frekvens och fältstyrka. Senare forskning visade att även det statiska jordmagnetfältets styrka och riktning hade betydelse. Olika forskare försökte under 1980- och 90-talen applicera dessa iakttagelser på kända fysikaliska modeller från olika grenar av fysiken. Flera jonresonansmodeller ställdes upp och testades i cell- och djurförsök.

Icke överensstämmande resultat och olika syn på jonresonansmodellernas teoretiska grunder kom att ge upphov till ett flertal artiklar och gemälen i den vetenskapliga litteraturen och till mycket livliga diskussioner vid forskarmöten. Någon hållbar generell jonresonansteori har dock inte ännu presenterats. Entusiasmen för de olika modellerna har underhand kommit att svalna alltmer. Generellt sett finns mer stöd för jonresonansmodeller vid cellförsök än från heldjursförsök och epidemiologiska studier. Sammanfattningsvis kvarstår observationerna om fönstereffekter och resonansliknande samband.

#### 3.2 Kalciumeffekter

Kalcium har en fundamental betydelse för många viktiga cellfunktioner såsom tillväxt och differentiering. Kalcium spelar också en avgörande roll för överföringen av impulser från receptorer på cellytan till processer inuti cellen. Studier av hur kalcium-

transporten i celler påverkas av magnetfält hade i början av 1990-talet en kraftig expansion. Resultat som rapporterades av enskilda forskargrupper har emellertid inte gått att upprepa. Området har därför minskat i intresse under senare år.

### **3.3 Genetiska effekter**

Genetiska effekter är intressanta att känna till av flera skäl. Dels kan förändringar i könscellernas arvsmassa ge upphov till skador hos avkomman, dels leder skador på det genetiska materialet till en ökad risk för olika cancersjukdomar.

Under 1980-talet presenterade amerikanska forskargrupper en lång rad forskningsresultat, dels kring hur genernas arvsmassa aktiveras, dels kring hur informationen i cellens DNA skrivs om till RNA och därmed till proteinbildningen. Resultaten antydde även här fönstereffekter både i frekvens, amplitud och exponeringstid, men även genspecifika effekter noterades. Effekterna föreföll också bero på om exponeringen var kontinuerlig eller intermitterande. I Sverige pågick vid denna tid forskning om genetiska effekter och kromosomskador bl.a. på ställverksarbetare.

Fortsatt forskning, främst vid University of Columbia, fortsätter att visa på att reaktionerna är frekvensspecifika och att det även kan finnas såväl amplitud- som tidsfönster. De svenska forskarnas resultat om kromosomskador och skador på cellernas DNA har emellertid varit svåra att upprepa av andra forskargrupper. Cellförsök, utförda under senare tid, har gett blandade resultat men antytt möjligheten till genskadande effekter, främst från intermitterande exponering.

### **3.4 Magnetitmekanismer**

I början av 1990-talet kom rapporter från USA om att små mängder av den vanligt förekommande järnoxiden magnetit hade hittats i människokroppen. Tidigare visste man att flera fåglar, däggdjur och fiskar orienterar med hjälp ett organ som innehåller små korn av magnetit och som känner riktningen och styrkan av det jordmagnetiska fältet. Om magnetit även fanns i människan kunde det bli lättare att hitta godtagbara fysikaliska förklaringsmodeller för en eventuell påverkan från yttre magnetfält. Ännu intressantare blev magnetithypotesen när det visade sig att magnetit anrikas i hjärnan och i cancervävnad. Ett annat intressant fynd var att leukemiceller från människa, odlade i en magnetitfri miljö, innehöll nära 100 gånger så mycket magnetit som hjärnvävnad.

Luften gick i ett slag ur magnetithypotesen då det visade sig att åtminstone en del av fynden kunde hänföras till föroreningar som uppkommit i samband med hanteringen i laboratoriet. Nya fynd om magnetitpartiklar i mänsklig vävnad väckte tillfälligt nytt liv i hypotesen 1997, men det vetenskapliga intresset för området har sedan dess varit lågt.

### 3.5 Melatoninhypotesen

Elektriska och magnetiska fälts eventuella påverkan på melatonin/serotoninrytmen var starkt i fokus i början av 1990-talet. Melatonin är ett hormon som produceras av tallkottkörteln i hjärnan och reglerar bl a kroppens dygnsrytm. Det var även känt sedan tidigare att melatonin har förmåga att hämma utvecklingen av vissa hormonberoende cancertyper. Melatonin är också en mycket kraftig antioxidant, dvs. utövar en skyddande verkan mot skadliga fria radikaler.

Entusiasmen för melatonin som förklaringsmodell har dock successivt avtagit då inledande epidemiologiska fynd inte visade sig hålla streck i utvidgade studier.

I ett väsentligt avseende har melatoninområdet kommit att förbli centralt inom EMF-forskningen då det är ett av de få områden där det finns framgångsrika upprepningsförsök. En amerikansk forskargrupp kunde i början av 1990-talet visa att 60 Hz magnetfält av måttlig styrka upphäver den skyddande effekten av melatonin på tillväxt hos odlade bröstcancerceller. Upptäckten har senare kunnat upprepas vid två andra amerikanska laboratorier. Ett annat fynd, som framgångsrikt upprepats, är att magnetfält motverkar den tillväxthämmande effekt som Tamoxifen (används för behandling av bröstcancer) har på odlade bröstcancerceller. Effekterna är här dock endast upprepningsbara med klonade celler av melatoninkänslig typ.

### 3.6 Fria radikaler

En hypotes, som funnits under hela rapporteringsperioden på 10 år, är att elektromagnetiska fält kan förlänga livet på fria radikaler i celler. Den tänkta mekanismen utgår från att magnetfälten stör den normala rekombinationen av fria radikalpar. Hypotesen har fått visst stöd från experimentell forskning.

Hypotesen om ett samband mellan magnetfält och fria radikaler har även kopplingar till melatonin och dess förmodade skyddseffekt. Melatonin fångar nämligen upp OH-radikaler, som teoretiskt kan skada cellernas DNA och därmed ge upphov till cancer. Några direkta bevis för hypotesens riktighet har emellertid inte presenterats. Teoretiska beräkningar har även visat att det sannolikt krävs högre fältstyrkor än jordmagnetfältets för att någon påverkan skall kunna ske.

Ett nytt forskningsområde med anknytning till fria radikaler har öppnats under de senaste åren, nämligen risken för demenssjukdomar genom oxidativ stress initierad av magnetfältsexponering. Hypotesen har fått visst stöd i cellförsök.

### 3.7 Cancerpromotion, enzymer, apoptos, påverkan på immunsystemet

Vid periodens början fanns amerikanska resultat som tydde på att magnetfält eventuellt kan utöva en co-promotorverkan på cancertumörer, vilket innebär att verkan av andra promotorer (påskyndare) förstärks. Effekten kunde detekteras i form av aktivering av vissa enzymer med koppling till tumöromvandling. Senare forskning på enzymer har

gett en mera splittrad bild. Direkta exponeringsförsök på tumörcellinjer har heller inte gett någon enhetlig bild vad beträffar påverkan på celldelning och -differentiering.

Programmerad celldöd (apoptos) är en viktig mekanism där kroppen gör sig av med skadade celler innan dessa omvandlas till cancerceller. En nedsättning av denna funktion har befunnits vara en tänkbar förklaring till cancereffekter på försöksdjur som exponerats för magnetfält i kombination med UV-ljus. En annan möjlig måltavla för magnetfältpåverkan är immunsystemet och därmed en ökad risk för t ex lymfatiska leukemier. De cellstudier som utförts på resp. områden är dock för få för att några närmare slutsatser skall kunna dras.

### **3.8 Slutsatser – cell- och molekylärbiologiska studier**

De senaste tio årens forskning på området celler och molekylärbiologiska system har varit omfattande. Liksom vid periodens början står det klart att extremt lågfrekventa elektriska och magnetiska fält, även av måttlig styrka, har förmågan att framkalla biologiska effekter i celler och vävnader. Många av dessa biologiska effekter är dock bara just effekter, sannolikt utan betydelse ur hälsosynpunkt.

Vissa hypoteser med bäring på hälsoriskfrågan har förstärkts något, andra har försvagats, åter andra tycks nästan helt ha fallit bort. Kopplingen mellan cellulära och molekylära effektmekanismer och olika fältkaraktäristika har inte fått någon större klarhet, snarare har bilden i vissa stycken blivit ännu mera komplicerad. Det enda mönster, som kan urskiljas med någon större tydlighet, är att intermittent exponering tycks medföra kraftigare effekter än kontinuerlig exponering – ett resultat som förefaller rimligt med tanke på exempelvis våra sinnesreaktioner på olika stimuli (ljus, ljud etc.).

De tänkbara mekanismer som skulle kunna förklara samband mellan EMF-exponering och uppkomst av olika sjukdomstillstånd har efter teoretiska analyser och experimentella prövningar förkastats. En anledning till att det är så svårt att hitta någon mekanism är kanske helt enkelt att det inte finns någon sådan.

Efter att EMF-forskningen i mer än 20 års tid haft sin tyngdpunkt i att kartlägga eventuella hälsoeffekter, t ex cancer, i kombination med 50-60 Hz magnetfält, har forskningen sedan några år tillbaka mer och mer börjat återvända till högfrekvensområdet, med speciell betoning på mobiltelefonfrekvenserna. ELF-området intar numera en alltmera blygsam del av rapporteringen, såväl vid de vetenskapliga konferenserna som i forskningslitteraturen.

## 4 Djurstudier

Försök med djur utgör en viktig länk mellan verkningshypoteser och effekter funna i experiment på celler och vävnader och är också ett sätt att experimentellt pröva hypoteser som genererats från epidemiologiska resultat. De mångtaliga djurstudier som har gjorts med avseende på magnetfält under senare tid har i första hand behandlat beteende, inlärnings- och minnesfunktion och andra effekter på nervsystemet, reproduktion och fosterutveckling, effekter på melatonin, påverkan på immunsystemet samt cancerpromotion.

### 4.1 Effekter på nervsystemet

Flera försök har visat att vissa beteendeparametrar samt inlärnings- och minnesfunktioner påverkas av elektriska och magnetiska fält. Vissa av försöksresultaten har kopplingar till de grundläggande verkningsmekanismerna. Speciellt gäller detta jonresonans och om halten av fria kalcium- och magnesiumjoner i hjärnbarken påverkas av exponeringen.

Flera försök på råttor och möss visar att magnetfältsexponering sätter ner de rumsliga minnesfunktionerna hos försöksdjuren. Andra försök visar att magnetfält kan minska effekten av vissa droger, t ex opiater. Ett långtidsförsök på råttor har inte kunnat visa några samband mellan magnetfält och neurodegenerativa sjukdomar.

### 4.2 Reproduktion och fosterutveckling

Åtskilliga försök har gjorts ända sedan 1970- och 80-talen för att detektera eventuella reproduktionseffekter på djur. Den generella bilden från den djurexperimentella forskningen är att endast ett fåtal studier indikerar att magnetfält kan ge skadliga effekter på fortplantningen. Som motvikt till detta kan nämnas att man i flera studier sett att ett bredbandigt magnetfält kan blockera missbildningseffekter i kycklingembryon.

I Sverige gjordes flera brett upplagda undersökningar på kor under 400 kV kraftledning av Lantbruksuniversitetet i Skara i början och mitten av 1980-talet. Slutatserna som drogs av forskarna var att 400 kV ledningar inte påverkar äggstocksfunktionen eller dräktigheten hos nötkreatur.

### 4.3 Melatonineffekter

Ett flertal försök på smågnagare under 1980-talet visade att elektriska och magnetiska fält kan hämma tallkottkörtelns utsöndring av melatonin i blodet. Detta förhållande ansågs öka risken för vissa hormonberoende cancertyper, t.ex. bröstcancer. Under 1990-talet har ytterligare djurstudier presenterats, som i vissa fall givit stöd för ett samband mellan magnetfält och melatoninberoende hälsoeffekter. Andra studier har emellertid inte visat samma entydighet eller antytt att eventuella orsakssamband kan vara mera sammansatta än man dittills antagit. Idag är melatonin som enda förklaringsmodell definitivt på väg ut ur bilden.

#### 4.4 Immunologiska effekter

En studie vid Sveriges Lantbruksuniversitetet har visat att sorkar och möss som lever under 220 och 400 kV ledningar har en signifikant sänkt halt av vita blodkroppar i blodet samt DNA-skador och tillväxtstörningar. Amerikanska studier på får, som betat under 500 kV ledningar, har dock inte gett samma entydiga resultat.

Andra studier på råttor och möss antyder att magnetfältsexponering initialt kan ha en aktiverande inverkan på immunsystemet men att långvarig exponering ger en återgång till normalläge eller på sikt utarmar kroppens förmåga till immunförsvar. Djurförsöken har i detta avseende vissa paralleller till observationer på människa.

#### 4.5 DNA-skador, fria radikaler

I en undersökning vid universitetet i Seattle fann en forskargrupp att två timmars magnetfältsexponering gav DNA-skador i hjärnceller hos råttor. Kompletterande studier med användande av olika kemiska substanser har gett stöd för hypotesen att magnetfältets skadeverkan på DNA sker via fria radikaler. Skador på DNA hos möss rapporterades även från en studie vid Sveriges Lantbruksuniversitetet när djuren levde under en 220 kV ledning (se föregående avsnitt 4.4). Flera forskargrupper har försökt upprepa resultaten utan framgång varför frågan om magnetfältens DNA-skadande effekter får anses som obesvarad.

#### 4.6 Cancer

Redan före 1993 fanns ett antal djurförsök som undersökt om EMF-exponering kan ge upphov till tumörer. Flertalet av dessa studier kunde inte finna något samband mellan magnetfältsexponering och ökad risk för tumörsjukdomar hos försöksdjuren. Studier som gjorts därefter har förstärkt denna bild.

Från försök med initiator/promotormodeller är bilden mera splittrad. Det finns tecken som tyder på att de olika resultaten i olika brösttumörstudier kan bero på djurspecifika skillnader, t ex mellan de olika stammar av försöksråttor som använts av olika forskargrupper.

Under de senaste tio åren har djurförsöken förfinats alltmer och övergått till en mera hypotesdriven forskning där man särskilt försökt komma underfund om tänkbara bakomliggande mekanismer.

#### 4.7 Slutsatser – djurstudier

En stor mängd studier på djur, främst med magnetfältsexponering, har rapporterats under perioden 1993-2003. Dessa försök har i första hand behandlat beteende, inlärnings- och minnesfunktion och andra effekter på nervsystemet, reproduktion och fosterutveckling, effekter på melatonin, påverkan på immunsystemet samt

cancerpromotion. Forskningsinsatserna har under den gångna perioden gett åtskillig ny kunskap på olika områden men inga direkta genombrott. I likhet med cell- och molekylärbiologin har inte heller den djurexperimentella forskningen lämnat några konkreta svar på frågan om exponering för lågfrekventa elektriska och magnetiska fält innebär en hälsorisk.

## 5 Studier på människa

De första rapporterna om tänkbara, skadliga biologiska effekter från kraftfrekventa fält kom från dåvarande Sovjetunionen redan under 1960-talet. Rapporterna gällde diverse centralnervösa symptom bland arbetare i 400-500 kV ställverk. De sovjetiska forskningsresultaten sammanfattades och presenterades vid en konferens i Cigré i Paris 1972, där de väckte stort uppseende. Vid denna tid riktades misstankarna om hälsorisker enbart mot den elektriska komponenten av fälten. Startsignalen för forskning om magnetfältens eventuella farlighet kom 1979, efter en rapport från det amerikanska forskarparet Wertheimer och Leeper. Rapporten antydde samband mellan barncancer och bostäder i närhet av ”elektriska högströmskonfigurationer”. Magnetfältfrågan och speciellt dess eventuella samband med olika cancersjukdomar kom att dominera forskningsområdet under hela 1980- och 90-talen. Förutom cancer har studier på människa även handlat om effekter på nervsystemet, på reproduktion, hjärt-kärlsystemet samt immunologiska effekter.

### 5.1 Effekter på nervsystemet

Som nämns ovan kom det tidigt rapporter från Sovjetunionen om effekter på anställda i högspänningsställverk. Rapporterna visade på diffusa subjektiva symptom som huvudvärk, trötthet, sömnbesvär och nedstämdhet vid arbete i starka elektriska fält. Även på svenska arbetsplatser rapporterades tidigt sporadiska symptom av liknande karaktär.

#### 5.1.1 Subjektiva symptom, kognitiva funktioner, EEG

Ett fåtal studier har sedan 70-talets början gjorts angående de ovan nämnda subjektiva symptomen. Resultaten ger en splittrad och delvis motsägande bild. Vissa studier pekar dock på ett samband mellan elektriska och magnetiska fält och minskad koncentration och prestation samt diffusa symptom som ökad trötthet, dålig hälsa och kronisk oro. Resultaten visar på överensstämmelse med hypotesen om att magnetfälten utövar en kronisk stresseffekt på det centrala nervsystemet.

Under början av nittioalet började forskningen mera systematiskt intressera sig för nervsystemeffekterna och då främst av effekterna på EEG (den elektriska aktiviteten i hjärnan). Hypotesen var att magnetfält fungerade som en biologisk stressfaktor med effekter på hjärnan. Den bild som sedan dess växt fram är att man inte har kunnat påvisa några klara samband och att forskarna nu tycks ha övergivit hypotesen.

#### 5.1.2 Varseblivning, el(över)känslighet

Ett flertal så kallade "provokationsstudier" har utförts på elöverkänsliga personer, främst i Sverige. Dessa studier har i allmänhet visat att individerna inte kunnat skilja mellan när de varit, respektive inte har varit exponerade. Även förmågan att detektera elektrisk och elektromagnetisk exponering, så kallad elkänslighet, har studerats. Elkänslighet är en nödvändig men inte tillräcklig förutsättning för elöverkänslighet. I vissa studier av varseblivning och elkänslighet har man sett att vissa individer kan ha en

lägre tröskelnivå än genomsnittet vilket kan tyda på att vissa personer har en ökad känslighet för att detektera svaga strömmar. Dessa personer behöver nödvändigtvis inte vara elöverkänsliga.

Sammanfattningsvis har forskningen på personer med självupplevd elöverkänslighet inte kunnat visa på någon enskild faktors betydelse för besvären. Det finns alltså fortfarande inte några entydiga svar på frågan om vad som orsakar elöverkänslighet, men vissa resultat pekar mot att frågan är komplex och har samband med en ökad känslighet för andra exponeringsfaktorer, t ex flimmer.

Precis som Rådet för arbetslivsforskning skrev i sin slutrapport år 2000 så kommer troligtvis elöverkänslighet även fortsättningsvis vara ett kontroversiellt ämne, främst på grund av skillnaderna mellan resultat av vetenskapliga studier och de elöverkänsligas egna erfarenheter. Värt att notera är att elöverkänslighet får överlägset mest uppmärksamhet i Sverige och att den mesta forskningen hittills bedrivits av svenska forskare.

### **5.1.3 Neurodegenerativa sjukdomar**

Hypotesen om ett samband mellan magnetfältsexponering och Alzheimers sjukdom framfördes för första gången i en studie som publicerades 1994. Ett amerikansk-finskt forskarteam redovisade en studie som tydde på att sömmerskor och skraddare löper ca tre gånger högre risk att drabbas av Alzheimers sjukdom än andra människor. Studien gjordes på fyra olika patientgrupper, två finska och två amerikanska, med så gott som identiska resultat. Symaskiner alstrar relativt kraftiga intermittenta magnetfält och sömmerskor och skraddare tillhör därför de mest magnetfältsexponerade yrkesgrupperna. Det fanns inga uppenbara förväxlingsfaktorer som skulle kunna förklara överrisken. Efter denna studie har en mängd andra följt, både på demenssjukdomar men även på multipel skleros (MS), Parkinsons sjukdom och ALS (amyotrofisk lateralskleros). ALS är en relativt ovanlig sjukdom men antalet fall ökar stadigt i de industrialiserade länderna.

En översiktsartikel på neurodegenerativa sjukdomar och exponering för elektriska och magnetiska fält baserad på metaanalysteknik, publicerades 2001. I denna konstaterades generellt svaga och ofullständiga samband med elektriska och magnetiska fält. Beträffande ALS finns relativt starka kopplingar till elarbete, men EMF är bara en av flera tänkbara förklaringar. Att elarbetare ofta utsätts för stötar under sitt yrkesutövande är också en tänkbar orsak till riskökningen.

Bland studier på Alzheimers sjukdom visar en majoritet på en överrisk men bilden är splittrad. För övriga demenssjukdomar är sambanden svagare. För MS har man inte hittat några samband. För Parkinsons sjukdom har samband setts i endast en studie, varför ett orsakssamband är mindre troligt.

## **5.2 Reproduktion**

Experimentell forskning på celler och embryon (se avsnitten 3 resp. 4) tyder på att

exponering för elektromagnetiska fält kan medföra genetiska effekter. Skador på könsceller eller på foster kan ge upphov till missfall eller missbildningar hos avkomman. Även kromosomerna i andra celler än könscellerna kan skadas.

De epidemiologiska studier som gjorts på såväl kvinnor som män har givit blandade resultat. I de flesta studierna har man inte sett några samband medan man i några studier funnit tendenser till samband med graviditetsstörningar, så kallade spontanaborter. I någon enstaka undersökning visades t o m gynnsamma effekter från magnetfälts-exponering i form av en halvering av missfallsrisken hos kvinnor som använt elfält eller vattensäng. År 2001 publicerades två amerikanska undersökningar som inte kunde påvisa något samband mellan magnetfältets medelvärde och missfallsrisken, men att ett visst samband förelåg mellan risken och maximal exponering under dygnet.

De sammanfattande översiktsartiklar som skrivits på området konstaterar dock att det inte går att visa några säkra tecken på att kraftfrekventa elektriska eller magnetiska fält medför några fosterskadande effekter eller någon annan negativ påverkan på människans fortplantning.

### **5.3 Melatonineffekter, sömnbesvär**

Effekter av EMF på melatoninutsöndring har visst stöd i djurförsök, som tyder på att fälten kan hämma utsöndringen av melatonin i blodet.

Ett inom elbranschen välkänt fenomen, som dock inte är vetenskapligt studerat på ett systematiskt sätt, är den så kallade ”ställverkssjukan”. Den kan drabba enstaka individer som arbetar eller vistas långvarigt i starka elektriska fält. Symptomen påminner om jet-lag (förskjutning av dygnsrytmen). En nedtryckning av melatoninhalten i blodet skulle hypotetiskt kunna vara en förklaring till fenomenet.

I en mängd sömnstudier har det undersökts om EMF-exponering påverkar människans melatoninnivåer. Det sammantagna intrycket är att man inte kunnat se några väsentliga skillnader i melatoninhalter mellan exponerade och oexponerade individer. Vissa forskargrupper har presenterat studier som gett stöd åt ett samband mellan magnetfält och melatoninberoende hälsoeffekter, medan andra inte visat samma resultat eller antytt att eventuella orsakssamband kan vara mera komplicerade än man tidigare antagit.

De få studier som är genomförda om påverkan på sömn av elektriska och magnetiska fält tyder på att sömnen kan påverkas av framför allt intermittenta fält. Antalet studier är dock alldeles för få för att några slutsatser skall kunna dras.

Sammantaget pekar resultaten åt olika håll varför det är svårt att dra några bestämda slutsatser. Dock kan vissa individer vara känsligare än genomsnittet och därigenom påverkas. På senare år har intresset för frågeställningen dalat och idag är endast ett mindre antal forskare verksamma inom området.

## 5.4 Depression

Relativt få studier är utförda på om depression och om ökad självmordsfrekvens kan ha något samband med att bo nära kraftledningar. De studier som gjorts visar ingen samstämmighet, varför det är oklart om det finns något samband. Det vetenskapliga intresset för frågeställningen är för närvarande lågt.

## 5.5 Hjärt-kärlsystemet

Redan 1967 rapporterades om att sovjetiska ställverksarbetare hade rubbningar i hjärta och blodkärl samt förändrad blodsammansättning. Vid denna tidpunkt var området inte särskilt väl undersökt och relativt lite forskning pågick. För tio år sedan var det känt att hjärtfrekvensen kan påverkas av elektriska och magnetiska fält. Effekterna, i form av sänkt puls, följer inte heller i detta fall den normala dos-responsmodellen utan uppträder i distinkta fönster i frekvens och amplitud. Intermittent exponering verkar vara mer verksamt än kontinuerlig.

Tidigare studier har visat att intermittent exponering har minskat hjärtats variabilitet (förmågan att öka eller sänka pulsen). Variabiliteten hos hjärtrytmen har betydelse för flera funktioner och tillstånd i kroppen, till exempel blodtryck, andning och temperatur. En nedsatt variabilitet kan innebära ökad risk för kranskärtsjukdomar och hjärtinfarkt.

Ett par tidiga studier påvisade ett tänkbart samband mellan långvarig magnetfältsexponering och död i akut hjärtinfarkt respektive hjärtarytmi (oregelbunden puls) medan två uppföljande studier inte visade något sådant samband.

Sammantaget ger de disparata forskningsresultaten ingen möjlighet till att dra några entydiga slutsatser om EMF-exponering påverkar hjärt-kärtsystemet.

## 5.6 Immunologiska effekter

Ett flertal studier på celler och försöksdjur har visat att magnetfält påverkar olika immunologiska parametrar. Få immunologiska studier är dock genomförda på människa. De studier som gjorts antyder att exponerade individer kan få sämre blodvärden, något som också verkar hålla i sig ett tag även efter det att exponeringen upphört. Underlaget för att kunna dra några bestämda slutsatser är dock alltför litet.

## 5.7 Kromosomskador

En svensk forskargrupp i Umeå presenterade redan i mitten av 1980-talet en undersökning som visade en förhöjd frekvens av kromosomskador i blodprover från högexponerade ställverksarbetare.

En studie på lokförare, utförd av samma forskargrupp, visade senare ett liknande samband. Lokförare tillhör de mest magnetfältsexponerade yrkeskategorierna. Olika kromosomavvikelser i vita blodceller studerades. Resultaten visade en ca fyra gånger

förhöjd frekvens av allvarigare kromosomskador bland lokförarna jämfört med kontrollgrupperna.

## **5.8 Cancer**

1979 publicerades en amerikansk forskningsrapport som visade att barn som bott i hus nära kraftledningar löpte större risk att dö i cancer. Detta blev startskottet för en omfattande forskning på samband mellan elektriska och magnetiska fält och cancer.

### **5.8.1 Barncancer**

Före 1993 hade ett tiotal studier på magnetfält och barncancer genomförts och till slutet av år 2003 hade ytterligare ett femtontal barncancerstudier redovisats. För att få en någorlunda säker uppskattning av exponeringen under sjukdomens utveckling är de flesta av studierna utförda på barn boende invid kraftledningar. Liksom fallet var med de tidiga barncancerstudierna visar även de senaste studierna statistiska samband mellan exponering för magnetfält och cancer, främst med leukemi. Däremot finns inga tydliga samband för någon annan barncancerform.

Barnleukemi är en ovanlig sjukdom, i exempelvis Sverige inträffar årligen ca 70 fall. Samtidigt är relativt få barn exponerade i någon högre grad. Detta gör att antalet fall och kontroller i studierna har varit litet, vilket lätt leder till att resultaten blir osäkra. Resultaten visar också att riskerna, om sådana finns, hör ihop med relativt höga och därmed ovanliga exponeringar.

Inte bara fält från kraftledningar har undersökts. Även vanliga hushållsapparater kan alstra relativt höga magnetiska fält. Några studier har genomförts som tittat på samband mellan barncancer och användandet av elfält, eluppvärmda sängar och andra elapparater i hushållet. Dessa studier har inte kunna se några samband med barncancer.

Flera amerikanska forskargrupper har fortsatt undersöka det som i USA kallas ”wire code-paradoxen”, det vill säga att avstånd och ledningars grovlek bättre än de uppmätta fälten tycks korrelera med en förhöjd barncancerrisk. Dessa studier har visat att paradoxen troligen har sin grund i att wire-coder bättre än mätningar har förmågan att avspegla den historiska exponeringen, dvs. den exponering som funnits före diagnos-tillfället.

Några av de amerikanska barnleukemistudierna har kritiserats på grund av möjligheter till så kallade selektionsfel i det statistiska urvalet av kontroller. Flera forskargrupper har analyserat frågan närmare och funnit att selektionsfelen visserligen kan ha förstärkt sambanden men endast till en mindre del kunnat förklara dem.

Den vetenskapliga debatten om risker i samband med exponering för elektriska och magnetiska fält och barnleukemi har under senare tid även omfattat alternativa förklaringar till de funna sambanden med kraftledningar. Bland dessa så kallade förväxlingsfaktorer nämns särskilt exponering för bilavgaser i samband med närhet till större trafikleder samt socioekonomiska faktorer som eventuellt skulle kunna

samvariera med närhet till kraftledningar. Som en ytterligare förväxlingsfaktor har ”kontaktströmmar” nämnts. Inga av de nämnda faktorerna har dock entydigt kunnat förklara de funna sambanden.

För att öka den statistiska säkerheten genomförs så kallade poolade analyser, där man lägger samman data från flera studier med likartad uppläggning. Två sådana analyser på barnleukemi och magnetfält publicerades under år 2000.

Den ena av dessa analyser visade en fördubblad risk för barnleukemi i bostäder där magnetfältet var 0,4  $\mu$ T eller mer. Underlaget utgjordes i detta fall av data från nio barnleukemistudier, däribland fyra nordiska. I dessa studier hade exponeringen uppmätts under 24 eller 48 timmar, och/eller beräknats utifrån historiska belastningsdata. Det stora antalet fall och kontroller gav även en större precision i riskberäkningen för de högre exponeringsnivåerna, där resultaten tidigare varit speciellt osäkra. Justering med avseende på tänkbara förväxlingsfaktorer hade ingen påtaglig inverkan på resultatet.

I den andra analysen studerades data från femton studier på barnleukemi i relation till magnetfält eller till "wire-codes". Även denna analys visade ett statistiskt samband mellan förhöjda magnetfältsvärden och förekomsten av leukemi hos barn. Analyserna visade även att den tidigare amerikanska uppfattningen att barnleukemi har en svagare koppling till magnetfält än till "wire-codes" är felaktig.

Sammantaget framstår magnetfält som den enskilda faktor som bäst förklarar den ökade risk för barnleukemi som konstaterats i enskilda kraftledningsstudier.

### **5.8.2 Vuxencancer, boendestudier**

Före 1993 hade endast ett fåtal studier gjorts på vuxencancer och exponering i boendemiljön. Dessa studier visade sammantaget inte några säkra tecken på samband mellan magnetfält och någon cancerform.

Efter 1993 har ytterligare ett antal studier genomförts. De exponeringskällor som undersökts har främst varit kraftledningar, men även användandet av elfiltar och eluppvärmda sängar har studerats.

Hypotesen om att förhöjda magnetfält nedsätter melatoninutsöndringen var i början av 1990-talet en stark drivkraft för att studera om det finns en koppling mellan magnetfält och bröstcancer. Flera uppmärksammade studier i början och mitten av 1990-talet stödde denna hypotes. Senare års epidemiologisk forskning med större antal fall och noggrannare exponeringsuppskattning har dock inte kunnat se några samband. De tidigare fynden kan därför antas ha berott på slumpen.

Även andra cancerformer, såsom hjärntumör, leukemi, prostatacancer och hudcancer, har undersökts. Sett till alla cancerformer visar resultaten inga entydiga samband. Det är svårt att upptäcka svaga samband, speciellt för en sådan inhomogen grupp som vuxna boende nära kraftledningar. Det är naturligtvis också svårt att avgöra hur bidraget från exempelvis yrkesexponering inverkar.

### **5.8.3 Vuxencancer, yrkesmiljöer**

1993 hade fler än 40-talet studier genomförts där man undersökt samband mellan exponering för magnetfält i yrkeslivet och olika cancerformer. Liksom övriga cancerstudier hade även de yrkesrelaterade studierna varierande kvalitet och metodik. Flertalet av de tidiga studierna var rena registerstudier, där man undersökt cancerincidensen för olika yrkestitlar. Man hade inte mätt fälten och hade heller ingen kontroll över möjliga förväxlingsfaktorer. En påfallande stor andel av studierna liksom ett par metaanalyser pekade emellertid mot en förhöjd risk för leukemi, speciellt undergruppen akut myeloisk leukemi (AML). Vissa andra studier antydde överrisk för hjärntumörer. Tre studier, som presenterades under 1990-91, visade även samband mellan elarbete och manlig bröstcancer, en mycket sällsynt tumörform med bara några tiotal fall per år i Sverige.

Forskningen kring EMF och yrkesrelaterad cancer har fortsatt. De studier som utförts under de senaste tio åren visar emellertid en mer svårtolkad och splittrad bild. Sammantaget har ungefär hälften av studierna under perioden visat på en överrisk, främst för olika leukemier, medan den andra hälften inte visat några samband. Sambandet mellan magnetfältsexponering och leukemier och hjärntumörer hos vuxna understöds även av ett par metaanalyser. Risken för hjärntumörer tycks dock variera kraftigt geografiskt. Amerikanska elarbetare uppvisar den högsta överrisken, 40 %, medan de studier som gjorts i Skandinavien inte redovisar några överrisker alls. Enstaka studier har pekat på ett samband mellan ökad leukemirisk och exponering för elektriska fält, något som skulle behöva utredas ytterligare.

### **5.8.4 Kombinerad exponering**

En handfull studier under senare delen av 1990-talet och början av 2000-talet har analyserat eventuella samband mellan cancer och exponering i boendemiljön kombinerat med exponeringen i arbetet. Flertalet av dessa studier har utförts av nordiska forskargrupper bland annat vid Karolinska institutet och Arbetslivsinstitutet. Kombinerade data från svenska studier visar att individer med hög exponering såväl i boendemiljön som i arbetet hade en nära fyrfaldig överrisk att drabbas av leukemi. För hjärntumörer hittades ingen förhöjd risk. Resultaten var emellertid baserade på så få fall att man inte kan utesluta slumpen.

Övriga studier med information om kombinerad exponering har inte kunnat visa några samband för någon cancerform.

## **5.9 Slutsatser – studier på människor**

Forskningen om skadliga effekter på människan till följd av exponering för elektriska och magnetiska fält har under de senaste tio åren varit omfattande. Studierna har gällt olika effekter på nervsystemet, t ex neurodegenerativa sjukdomar, reproduktion, melatonineffekter och därtill relaterade besvär och sjukdomar, symptom och sjukdomar kopplade till hjärt-kärlsystemet, effekter på immunsystemet, kromosomskador samt cancer. Den senare frågan har underkastats en speciellt stor forskningsinsats.

Beträffande effekter på nervsystemet är sambanden med EMF generellt ganska svaga och ofullständiga. Forskningen visar att svaga elektriska och magnetiska fält inte tycks påverka hjärnvågorna, däremot kvarstår hypotesen om att fälten kan utöva en kronisk stressverkan på nervsystemet med olika diffusa symptom som följd. För området neurodegenerativa sjukdomar finns ett relativt starkt samband mellan ALS och elarbete, men EMF är bara en av flera tänkbara förklaringar. Majoriteten studier på Alzheimers sjukdom visar en överrisk i kombination med magnetfältsexponering men bilden är långt ifrån entydig. För övriga neurodegenerativa sjukdomar är sambanden svagare eller inga alls.

Resultaten på reproduktionsområdet visar inga säkra tecken på att kraftfrekventa elektriska eller magnetiska fält medför några fosterskadande effekter eller någon annan negativ påverkan på människans fortplantning.

Melatoninhypotesen som generell förklaringsmodell till olika besvär och sjukdomar har i stort sett övergivits. Vissa tecken tyder dock på att dygnsrytm och sömn skulle kunna påverkas hos särskilt känsliga individer, speciellt av intermittent exponering.

Det får anses som bevisat att hjärtrytmen kan påverkas av elektriska och magnetiska fält. Effekten (sänkt puls) är en fönstereffekt och uppträder främst i samband med intermittent exponering. Beträffande övriga hjärtfunktioner och tillhörande sjukdomar finns inga entydiga samband med EMF.

Vissa tecken tyder på att exponering för elektriska och magnetiska fält skulle kunna påverka immunsystemet hos människan. Området är inte särskilt välundersökt men kan vara av stor potentiell betydelse.

Kromosomskador i samband med yrkesmässig exponering är främst visat av en svensk forskargrupp. Det är osäkert om EMF är den bakomliggande orsaken.

Den ojämförligt största forskningsinsatsen har gjorts på cancerområdet. Resultaten tyder relativt entydigt på ett samband mellan magnetfält från kraftledningar och barnleukemi med en ungefär fördubblad risk för den mest exponerade gruppen. Inga samband är visade för någon annan barncancerform. Motsvarande boendestudier för vuxna har inte visat några entydiga tecken på samband. Forskningen på EMF och yrkesrelaterad cancer uppvisar en något svårtolkad och splittrad bild med antydningar till samband med leukemier och hjärntumörer. Några studier har även pekat på samband mellan ökad leukemirisk och exponering för elektriska fält.

## 6 Sammanfattande slutsatser

### 6.1 Cancer

Cancer är den problemställning som varit föremål för mest forskning under den gångna tioårsperioden. Från epidemiologin finns statistiska samband som tyder på att exponering för magnetfält över 0,4  $\mu$ T från kraftledningar ungefär fördubblar risken för barnleukemi. När det handlar om så små relativa riskökningar krävs även bevis från experimentella studier och en trovärdig mekanism för att ett orsakssamband skall anses föreligga. I detta fall finns dock ingen trovärdig mekanism och inget stöd i experimentella studier. De statistiska sambanden kan således ha andra orsaker som råkat samvariera med magnetfälten eller med närheten till kraftledningar. Inga andra alternativa förklaringsmodeller eller förväxlingsfaktorer har emellertid kunnat uppvisa någon större trovärdighet. Därför kvarstår magnetfält trots allt som den mest sannolika förklaringen till den förhöjda risken för barnleukemi. Ingen annan barncancerform uppvisar samband med EMF. Ett par barnleukemistudier befinner sig i slutfasen eller är under publicering. Resultaten från dessa studier kan knappast komma att förändra den totala bilden, men studierna bör hållas under bevakning, för att en aktuell bild skall finnas.

Epidemiologiska studier från området EMF och cancer i elyrken har visat något svårtolkade samband med leukemier och hjärntumörer men inte med någon annan cancerform. Överriskerna är små och otydliga och kan bero på allehanda förväxlingsfaktorer. Det finns inga understödjande data från vare sig djur- eller cellodlingsförsök. De enda någorlunda trovärdiga bevisen från djurexperimentell och mekanistisk forskning gäller sambandet via melatonin med bröstcancer. Å andra sidan saknas här tydliga epidemiologiska bevis för ett samband.

Några epidemiologiska studier har pekat på samband mellan ökad leukemirisk och exponering för elektriska fält. Denna fråga har under de senaste 20 åren endast varit föremål för sporadisk behandling.

### 6.2 Effekter på nervsystemet

Ett antal hälsoundersökningar och epidemiologiska studier antyder samband mellan elektriska och magnetiska fält och minskad koncentration och prestation samt diffusa symptom som huvudvärk, ökad trötthet mm. Resultaten visar på överensstämmelse med hypotesen om att magnetfälten utövar en kronisk stresseffekt på det centrala nervsystemet. Resultaten understöds i viss mån från djurexperimentell forskning men resultaten är sammantaget långt ifrån fullständiga.

Diffusa besvär från det centrala nervsystemet ingår även i symptombilden för elöverkänslighet. För denna sjukdomsbild saknas emellertid stöd från s.k. provokationsförsök.

För området neurodegenerativa sjukdomar finns ett relativt starkt samband mellan ALS och elarbete, men EMF är bara en av flera tänkbara förklaringar. Majoriteten epidemiologiska studier på Alzheimers sjukdom visar en överrisk i kombination med magnetfältsexponering men bilden är långt ifrån entydig. För övriga demenssjukdomar är sambanden svagare eller inga alls. För de neurodegenerativa sjukdomarna i sin helhet saknas nästan helt information eller bevis från det experimentella eller mekanistiska forskningsområdet.

### **6.3 Reproduktion och fosterutveckling**

Av de studier som gjorts på reproduktionsområdet kan man konstatera att det inte finns några säkra tecken på att kraftfrekventa elektriska eller magnetiska fält medför några fosterskadande effekter eller annan negativ påverkan på människans fortplantning. Djurförsök inom kraftfrekvensområdet har med något enstaka undantag inte kunnat visa några skadliga effekter på reproduktion eller fosterutveckling. Från det mekanistiska området saknas i stort sett helt information.

Med ovanstående bild som bakgrund är det tveksamt om området kräver fortsatt bevakning.

### **6.4 Effekter på immunsystemet**

Viss forskning och kliniska observationer tyder på att exponering för elektriska och magnetiska fält skulle kunna påverka immunsystemet hos speciellt mottagliga människor. Området är inte särskilt välundersökt men kan vara av stor potentiell betydelse. Det bästa stödet för hypotesen kommer från cell- och djurförsök som visat att magnetfält kan påverka olika immunologiska parametrar. Ett speciellt noterbart fynd är att magnetfältsexponering initialt verkar ha en aktiverande inverkan på immunsystemet men att långvarig exponering ger en återgång till normalläge eller på sikt utarmar kroppens förmåga till immunförsvar.

### **6.5 Fältvariabler - mekanismer**

Forskningen kring olika fältvariabler och därtill hörande mekanismer har varit omfattande. Den förhoppning som närdes vid periodens början om att man skulle kunna hitta någon eller några EMF-specifika mekanismer har inte infriats. Ett genomgående tema, såväl i djurstudier som i cell- och molekylärbiologiska studier som i studier på människa är att magnetfältens växlingar (dB/dT), speciellt intermittensmönstret, verkar ha större betydelse än fältet självt (B). En annan generell iakttagelse är att biologiska effekter ofta uppträder som fönstereffekter i amplitud, frekvens, ibland även i tid. Förekomsten av olinjära samband gör det speciellt svårt att diskutera gränsvärden.

## **7 Bakgrundsrapporter 1993 - 2003**

Hälsoeffekter av kraftfrekventa elektriska och magnetiska fält - en översikt. GT-rapport 3931 till Elforsk, Vattenfall Transmission AB, 1993-11-30.

Hälsoeffekter av kraftfrekventa elektriska och magnetiska fält - förslag till fortsatta svenska forskningsinsatser. GT-rapport 3932 till Elforsk, Vattenfall Transmission AB, 1993-12-08.

Hälsoeffekter av kraftfrekventa elektriska och magnetiska fält - 1994 års forskningsresultat. GT-rapport 3941 till Elforsk, Vattenfall Transmission AB, 1994-12-30.

Hälsoeffekter av kraftfrekventa elektriska och magnetiska fält - litteraturgenomgång för år 1995. GT-rapport 3003 till Elforsk, Vattenfall Transmission AB, 1996-03-18.

El- och Magnetfält, Elforsks årliga rapporter om EMF-forskningen, 1996-2003.

## Ordlista

**Centralnervösa symptom** = symptom relaterade till det centrala nervsystemet, t ex huvudvärk, trötthet, oro, sömnproblem, koncentrationssvårigheter etc.

**Epidemiologi** = studiet av sjukdomars utbredning i en befolkningsgrupp (t ex boende intill en högspänningsledning) eller i en yrkesgrupp (t ex ställverksarbetare, elsvetsare etc.)

**Fältvariabler** = olika sätt att karaktärisera elektriska och magnetiska fält t ex genom fältstyrka, flödestäthet, frekvens, polarisation, innehåll av övertoner och transienter, intermittensmönster etc

**Fönstereffekter** = effekter som inte följer det vanliga dos-responsmönstret utan uppträder i mer eller mindre distinkta "fönster" i frekvens, amplitud; ibland även i tid, - "mer" behöver inte alltid betyda "värre". Ett annat ofta använt uttryck är olinjära samband.

**Inducerad ström** = ström som alstras i ledande föremål genom ett växlande magnetfält. I en människokropp alstrar ett växelströmsfält strömmar i slutna banor, s.k. virvelströmmar.

**Jonresonans** = en hypotetisk verkningsmekanism utgående från forskningsresultat tydande på att vissa biologiskt betydelsefulla joner, t ex kalcium, natrium, kalium och magnesium påverkades i distinkta "fönster" i frekvens och fältstyrka. Senare forskning har visat att även det statiska jordmagnetfältets styrka och riktning har betydelse. Flera jonresonansmodeller från olika grenar av fysiken, t ex cyklotronresonans, parametrisk resonans (PMR resp. IPR) har ställts upp och testats i cell- och djurförsök med varierande framgång.

**Kognitiva funktioner** = funktioner som har med tanke och intellekt att göra

**Kontaktström** = ström som uppstår vid kontakt med föremål av annan elektrisk potential. Hypotesen om att det är kontaktströmmar och inte magnetfält som är den verkliga orsaken bakom sambandet mellan barnleukemi och kraftledningar har framförts av amerikanska forskare. Två olika källor till kontaktströmmar har undersökts: Den ena källan uppstår genom den spänning som bildas mellan nollledaren i elcentralen och vattenledningen. Denna potentialskillnad kan ge en kontaktström genom kroppen om en person vrider på en vattenkran och samtidigt håller i en elapparat. I det andra fallet uppstår strömmen genom potentialskillnader mellan metalliska vatten- resp. avloppsledningar till följd av magnetisk induktion från närbelägna kraftledningar. I praktiken medför detta att man får en svag ström genom kroppen när man ligger i badet och tar i vattenkranen.

**Meta-analys** = en metod att göra en samlad bedömning av ett antal jämförande undersökningar genom att statistiskt sammanföra deras resultat.

**Nervexitation** = när den inducerade strömmen blir så stark att den triggar nervändar så att de fyrar av nervimpulser (exiteras). Kan åstadkomma ofrivilliga muskelsammandragningar.

**Oxidativ stress** = stresspåverkan t ex på odlade hjärnceller från råttor. Kan framkallas med hjälp av NO eller  $\text{Fe}^{2+}$ , hypotetiskt även av magnetfält. Oxidativ stress ökar mängden av fria radikaler som i sin tur skulle kunna orsaka celldöd och vara en förklaring till den ökade risken för demenssjukdomar som konstaterats hos magnetfältsexponerade yrkesgrupper.

**Poolad analys** = analys av sammanslagna resultat från epidemiologiska studier av likartad design. Den mest citerade i EMF-sammanhang är den poolade analysen av nio st barnleukemistudier av Ahlbom m fl från 2000. Poolade analyser ger säkrare resultat genom ett ökat antal exponerade fall och kontroller.

**Transientier** = snabba ”spikar” (på milli- eller mikrosekunder). Uppträder i samband med kopplingar i nätet, till- och frånslag av apparater etc.

**Vagabonderande strömmar** = strömmar som tar en annan väg tillbaka till transformatorn än genom den matande kabelns PEN-ledare (med sammankopplad skyddsjord och nolledare). Vanligt förekommande i tätortsmiljöer med vattenledningar av metall, i fjärrvärme- och ventilationsrör, byggnadsarmering etc.

**Wire-codes** = ett system att gruppera fall och kontroller i exponeringskategorier utgående från bostadens belägenhet i förhållande till olika elledningar. Uppfanns ursprungligen av det amerikanska forskarparet Wertheimer och Leeper i deras studie från 1979. Wire-codes var en surrogatmetod eftersom det inte fanns hanterbara magnetfältsinstrument vid denna tid. Ledningskoderna, som var fem till antalet, baserades på avstånd och ledningarnas grovlek.

**Övertoner** = multiplar av grundfrekvensen, dvs. av 50 Hz i Sverige. Vanligast förekommande är udda multiplar, dvs. 150 Hz, 250 Hz, 350 Hz o.s.v.

# **ELFORSK**

SVENSKA ELFÖRETAGENS FORSKNINGS- OCH UTVECKLINGS – ELFORSK – AB  
Elforsk AB, 101 53 Stockholm. Besöksadress: Olof Palmes Gata 31  
Telefon: 08-677 25 30. Telefax 08-677 25 35  
[www.elforsk.se](http://www.elforsk.se)