



Magnetfält i kabelmiljö

Elforsk rapport 10:109



Anette Larsson och Göran Olsson

September 2010

ELFORSK

Magnetfält i kabelmiljö

Elforsk rapport 10:109

Anette Larsson och Göran Olsson

September 2010

Förord

Elforsk har sedan 1990-talet bedrivit verksamhet inom området kraftfrekventa elektriska och magnetiska fält (EMF). Detta projekt har genomförts inom programmet under år 2008-2009 och omfattade bl.a. forskning kring arbetsmiljöförhållanden med avseende på elektriska och magnetiska fält vid arbete under spänning i kraftledningsmiljö mm. Arbetet i denna rapport har initierats av programmets styrgrupp och granskats av Svensk Energis EMF-grupp bestående av:

Mats Wahlberg (ordf), Skellefteå Energi
Sven-Olof Lång (sekr), Svensk Energi
Lennart Engström, Vattenfall Eldistribution
Jan Berglund, Vattenfall
Bengt Hanell, Elforsk
Eskil Agneholm, Fortum Distribution
Ulf Thorén, E.ON Elnät Sverige
Eva Bergius och Lars Wallin, Svenska Kraftnät

De företag som bidragit till finansieringen av detta projekt är: E.ON Elnät Sverige AB, Fortum Distribution AB, Gävle Energi AB, Göteborg Energi AB, Halmstad Energi och Miljö AB, Jämtkraft AB, Luleå Energi Elnät AB, Mälarenergi Elnät AB, Skellefteå Kraft AB, Sundsvall Energi Elnät AB, Svenska Kraftnät, Växjö Energi Elnät AB, Öresundskraft AB.

Stockholm september 2010
Bengt Hanell
Elforsk AB
Programområde Överföring och distribution

Sammanfattning

Den ökande användningen av kabel för landsbygdsnät och för att föra in kraft till storstäderna har medfört att man alltmer studerar förekommande magnetfält i olika miljöer. I synnerhet det omfattande utredningsarbetet inför projekten ingående i Stockholms Ström har initierat ett antal magnetfältsstudier. Fokus har i allmänhet legat på allmänhetens exponering för förhållandevis låga magnetfält. Man har bl a ägnat stor omsorg åt att beräkna magnetfält på markytan över kabel i mark eller förlagd i tunnel. Mindre insatser har gjorts för att beräkna magnetfält i arbetsmiljön, ex vis inne i transformatorstationer, nära kopplingspunkter eller nära kabelförband i tunnlar och andra utrymmen. I det här arbetet har därför fokus lagts på arbetsmiljön för dem som i sitt arbete kommer nära kablar i drift. Här kan också påpekas att en skärmad kraftkabel inte ger upphov till något elektriskt fält i sin omgivning.

Magnetfält runt kabelförband kan minskas genom att faserna placeras på lämpligt sätt. Litet fasavstånd och med fördel med faserna i triangelform ger litet magnetfält. I vissa lägen kan skärmning bli nödvändigt, men skärmning av magnetfält är en betydligt dyrare lösning än en ändring av kabellayouten. Skärmning medför även i allmänhet att kablarnas belastbarhet minskar. Med omsorgsfull skärmning kan fältet begränsas med en faktor 10 och i vissa fall än mer. Vid skärmning av rum och större ytor ökar dock svårigheterna och kostnaderna att åstadkomma en ideal skärm, då plåtskarvar och håltagningar kräver mycket arbete. I praktiken bestäms ofta den totala skärmverkan mer av sådana ofullkomligheter i skärmen än av de släta plåtarnas egenskaper.

Två skilda kabelmiljöer har studerats mer i detalj – kabelskåp för lågspänning och högspänningskabel i tunnel. Kabelskåpen har tidigare uppmärksammats i en finsk studie och i en studie publicerad av Elforsk. Den finska studien fokuserade på elmontören och den inverkan som övertonerna har på magnetfältet och arbetsmiljön. Resultatet av den tidigare svenska studien, kompletterad med mätningar och beräkningar i detta projekt, tyder inte på att övertonerna skulle ha någon större inverkan på den totala exponeringen. Beräkningar baserade på "ett värsta fall" visar att den maximala magnetfältsnivån kan uppgå till drygt 90 μT på ett avstånd av 30 cm från skåpets skenor. Om avståndet ökar till 50 cm, så minskar fältet till knappt 40 μT .

Den andra arbetsmiljön – tunnlar med högspänningskabel blir allt vanligare och ett möjligt scenario är arbete (ev skarvning) på ett förband, medan all last överförs på återstående kabel i tunneln. Magnetfältet nära de kablar som är i drift blir högt och uppgår till 300 - 400 μT vid höglast, men fältet avtar fort med ökande avstånd. Vid arbete i kabeltunnel krävs ett planerat arbete och uppmärksamhet på avstånd och arbetssätt.

Nu när detta skrivs våren 2010 råder det fortfarande osäkerhet om innehållet i den kommande utgåvan av ICNIRP Guidelines. Utgåvan från 1998, som legat till grund för standarder och nationella föreskrifter, har diskuterats och ändringar har föreslagits. En remissutgåva publicerades sommaren 2009, men ännu är det oklart hur den slutgiltiga versionen kommer att se ut. I denna rapport hänvisas därför både till 1998 års utgåva och till remissutgåvan från 2009.

Summary

The increasing use of HV cables for distribution networks and for transmission of power to the centre of big cities has initiated more studies of the magnetic field in different cable environments. The studies for Stockholms Ström have included a number of magnetic field studies. Most of these have been focused on the exposure of the general public and of fields on the ground caused by cables in ducts and tunnels. There have not been so many studies including the exposure of workers in their usual working environment, close to cables and other installations. This work will therefore focus on the exposure of workers in their normal working environment. It can also be mentioned that shielded cables do not cause any electric field in their environment

Magnetic fields around cables can be decreased by a suitable arrangement of the phase conductors. A small distance phase-phase will give a low magnetic field. If possible, an arrangement with the phases in trefoil form can be used to minimize the magnetic field. Shielding is more expensive than a changed cable layout and may also result in a reduced current rating factor of the cable. A careful shielding can result in an attenuation of 10 times or even more in some cases. Shielding of rooms and larger areas is complicated and will be expensive as necessary holes and joints will have a large impact on the final result. The total effectiveness of a shield is mostly determined by such imperfections rather than the shielding effectiveness of the individual plates.

Two different cable locations have been studied more in detail – Cable distribution cabinets for low voltage and High Voltage cables in tunnels. Results from measurements close to cabinets have previously been published by the University of Tampere, Finland, and also by Elforsk. The study from Finland was focused on the worker and the influence of the harmonics on the exposure for magnetic fields. However, the result from the previous study by Elforsk and from this study does not support the opinion that the harmonics should have a large impact on the total exposure level. Calculations based on a “worst scenario” indicate that the maximum magnetic field level may reach 90 μT at a distance of 30 cm from the busbars in the cabinet. At 50 cm distance the field level has decreased to about 40 μT .

The second working place – tunnels with HV cables will be more common and a possible scenario is working with a cable joint when the load is taken up by the remaining cables in the tunnel. The magnetic field close the cables still in service will be high, with levels about 300 - 400 μT at high load, but the field will decrease rather quickly from the conductors. Working in tunnels with cables in service will require careful planning and attention.

The previous edition, from 1998, of the Guidelines from ICNIRP has now been discussed for some years. A draft version, with some important changes, was also published in July 2009. However, it is still not known what exactly will be included in the final version. In this report, there are references to both editions and the more important differences between them will be discussed.

Innehåll

1	Inledning	1
2	Litteraturoversikt	3
2.1	Tidigare rapporter från Elforsk	3
2.2	CIREN – International Conference on Electricity Distribution	5
2.3	Rapport från Cigré.....	6
2.4	Standarder	7
3	Gränsvärden och riktvärden för exponering	9
3.1	ICNIRP Guidelines 1998	9
3.2	Riktlinjer från EU och från Strålskyddsinstitutet	11
3.3	ICNIRP 2009	12
3.4	Riktlinjer avseende akuta effekter i sammandrag	21
3.5	Eventuella långtidseffekter av fält	21
3.6	Riktlinjer avseende långtidseffekter i sammandrag	26
4	Magnetfält från kabelförband	27
4.1	Magnetfält från kabelförband utan skärm	28
4.1.1	En enkel 1-fas kabel.....	28
4.1.2	3 st 1-fas kablar i horisontell konfiguration	30
4.1.3	3 st 1-fas kablar i triangulär konfiguration	33
4.1.4	3 x 3 st 1-fas kablar i horisontell och triangulär konfiguration....	35
4.2	Magnetfält från kabelförband med skärm	38
4.2.1	Skärmens tjocklek	38
4.2.2	Skärmens ledningsförmåga.....	39
4.2.3	Plan och horisontell skärm	39
4.2.4	Bockad skärm med öppningen mot ledarna.....	43
4.2.5	C-bockad skärm	46
4.2.6	Dubbelskärm med aluminium- och järnplåt	47
4.3	Introduktion till analytisk beräkning av skärmning.....	50
4.3.1	Grundläggande om vågutbredning	50
4.3.2	Absorption	51
4.3.3	Reflektion	52
4.3.4	Multipelreflektion	53
4.3.5	Den sammanlagda effekten av en plan skärm	53
4.3.6	Skärm med hål.....	54
4.3.7	Jämförelse mellan numeriska och analytiska beräkningar	55
4.4	Kabelförband med osymmetrisk belastning.....	57
5	Mätningar och instrument	59
6	Kabelskåp för lågspänning	61
7	Arbete invid kablar i tunnel	65
8	Slutsatser och rekommendationer	73
9	Referenser	77

1 Inledning

Användningen av högspänningskabel har ökat markant under senare år. Stora landsbygdsnät har kablfierats med 10 - 20 kV kabel och kablar för högre spänningar används alltmer för att leda in kraft till storstädernas mer centrala delar. Till kabelnäten kan man också räkna anslutningspunkterna i transformatorstationer/-kiosker och de mindre kabelskåpen för lågspänning.

Den alltmer ökande användningen av kabel har också medfört att man studerat förekommande magnetfält i olika miljöer. I synnerhet det omfattande utredningsarbetet inför projekten ingående i Stockholms Ström har initierat ett antal magnetfältsstudier. I detta arbete och i flertalet andra projekt har dock fokus varit på allmänhetens exponerings för förhållandevis låga magnetfält. Man har bl a ägnat stor omsorg åt att beräkna magnetfält på markytan över kabel i mark eller förlagd i tunnel. Betydligt mindre insatser har gjorts för att beräkna magnetfält i arbetsmiljön, ex vis inne i transformatorstationer, nära kopplingspunkter eller nära kabelförband i tunnlar och andra utrymmen. I det här arbetet har därför fokus lagts på arbetsmiljön för dem som i sitt arbete kommer nära kablar i drift. I litteraturstudien kommer dock en del material att tas upp som mer eller mindre berör allmänhetens exponering och detsamma gäller avsnittet om kabelförläggning och skärmning, då det är faktorer som berör både allmänhet och yrkesverksamma.

Isolerad kabel möjliggör arbete på kort avstånd från strömledaren, jämfört med oisolerade system. Därmed finns också en risk för att montörer och drift- och underhållspersonal exponeras för höga magnetfält. I den här studien visas några exempel på olika arbetsmiljöer och vilka nivåer på magnetfält som då kan bli aktuella.

Det finns enkla medel att minska magnetfälten från kabelförband, t ex genom förläggning med faserna i triangel eller bara genom att lägga faserna horisontellt med kortast möjliga fasavstånd. Vinsten av detta är som störst då belastningen är hög, men dessvärre verkar kompakteringen begränsande på kablarnas belastbarhet. Effekter av varierande grad av kompaktering kommer att diskuteras längre fram i rapporten. Det skall betonas att användningen av kabel i stället för skenor ger betydande fördelar vad det gäller förläggningen och möjligheten att på detta sätt reducera magnetfältet.

För höga magnetfält kan begränsas genom skärmning. Effekten av skärmning kan dock ibland vara svår förutse och därför visas i rapporten några enkla exempel på vad skärmning kan göra.

Ett kompakt trefasigt kabelförband kan ha ett lågt yttre magnetfält, men det förutsätter en symmetrisk belastning. Även en mindre skillnad mellan fasströmmarna medför att det yttre magnetfältet ökar väsentligt. Obalans av detta slag förekommer inte sällan i lågspänningsfördelningar. I några exempel kommer det att visas vad osymmetriska strömmar kan medföra för magnetfältet.

Vid transformatorernas anslutningar och i kabelskåp är fasavstånden vanligen större än ute i förbanden och magnetfältet därmed högre. Dessa miljöer är

därför av särskilt intresse i en sådan här studie och detta kommer att visas med ett par exempel.

Regelverken, både de nationella och de internationella, för exponering för elektriska och magnetiska fält, är inte färdiga och troligen kommer den punkten att dröja ännu något år. Däremot är det högst troligt att vi kommer att få en uppdelning av föreskrifterna i exponering av allmänhet och av de som exponeras som en följd av sitt arbete. Likaså får vi med största säkerhet en uppdelning i omedelbara effekter av exponering och i eventuella långtids-effekter. I denna studie ligger fokus på gruppen arbetstagare och omedelbara effekter av förhållandevis höga fält, men även exponering under längre tid och för lägre nivåer kommer att beröras.

En svårighet är att den internationella strålskyddsorganisationen ICNIRP ännu inte publicerat några nya riktlinjer för hur exponering av allmänhet och arbetstagare skall bedömas. De befintliga riktlinjerna är från 1998 [1] och en ny utgåva är på väg att tas fram, men den är ännu på remisstadiet [2]. Denna rapport har därför baserats både på remissutgåvan från 2009 och på den tidigare utgåvan från 1998.

2 Litteraturöversikt

Det finns en mycket stor mängd litteratur som berör magnetfält från luft-ledningar, men betydligt mindre som rör fält från kablar, transformatorstationer/ -kiosker och andra mindre installationer. I det här avsnittet kommer fyra tidigare rapporter från Elforsk att tas upp, liksom några rapporter från CIRED konferenser (International Conference on Electricity Distribution). Organisationen Cigré har nyligen givit ut en värdefull guide om begränsning av magnetfält från olika kabelarrangemang och den kommer givetvis också att beröras. Avslutningsvis görs en kortare genomgång av några aktuella standarder inom området. Medvetet har denna litteraturgenomgång hållits något bredare än projektets mål. En hel del berör transformatorstationer och deras layout, men detta material finns med för en mer allmän orientering om förekommande fältnivåer.

2.1 Tidigare rapporter från Elforsk

I en rapport från Elforsk utgiven 1997 redovisas en mätning av magnetfältet längs 104 km gångbana i Stockholm [3]. Fältet har mätts på 1 meters höjd. Det visade sig att medelvärdet i innerstaden låg på 0,39 μT och i förorterna på 0,19 μT . För flertalet gator i innerstaden noterades värden mellan 1,0 och 2,5 μT och i några extremfall upp till 6 -7 μT . Magnetfältets storlek ändrades språngvis i tiden, med någon och upp till 20 sekunders mellanrum. Orsaken till magnetfälten och deras variationer förklarades med av att de är kopplade till sammanlagring av enfasiga belastningar och av vagabonderade strömmar.

I november 2000 kom den första rapporten i en serie av tre som berör teori och praktiska lösningar för att reducera magnetfält från kabelförband och transformatorstationer [4]. I denna första rapport med titeln "Möjligheter att reducera magnetfält" nämns något om den teoretiska bakgrunden och om hur mätningar bör läggas upp för att ge ett relevant resultat. Huvuddelen av rapporten ägnas åt en genomgång av några praktikfall, bl a kablar och nätstationer.

För kablar betonas vikten av att hålla fasavstånden korta och om möjligt använda triangelkonfiguration. Vid mer än en kabel per fas rekommenderas skiftad fasordning. Osymmetrier nämns och likaså något om bakgrunden till vagabonderade strömmar i vattenrör och andra ledande konstruktioner i mark och byggnader.

När det gäller nätstationer diskuteras framförallt förbandet mellan transformatorn och lågspänningsfördelningen. Användning av 3-faskablar rekommenderas före 1-faskablar och likaså att förbanden hålls så korta som möjligt och inte är monterade på vägg eller tak mot rum där personer vistas mer stadigvarande. Kabelförband i tak i en station med annan verksamhet ovanpå kan vara ett sådant mindre lyckat exempel. Bättre är då att transformatorn har sina anslutningar mot golvnivå. Skärmning diskuteras givetvis i rapporten och det ges ett exempel på vad som kan åstadkommas genom en omsorgsfullt utförd skärmning.

Man redovisar mätningar i och i anslutning till en inbyggd nätstation belägen i källarvåningen i en byggnad och med annan verksamhet i planet ovanför. Magnetfältet har mätts före och efter att en rad åtgärder har genomförts och reduktionen är påtaglig. För flertalet mätpunkter i våningsplanet ovanför fås mer än en halvering av fältet och i några fall ner till 1/10 av den ursprungliga nivån. Stationen har skärmats med Al-plåt i väggar och tak och lågspänningsförbandet har ersatts med 3-faskablar.

Den andra rapporten i serien om nätstationer publicerades 2002 och fick titeln "Konstruktioner för att erhålla låga magnetfält i distributionsanläggningar" [5]. Fokus i denna rapport lades på hur magnetfältet byggs upp från olika anläggningsdelar och på vilka möjligheter det finns att modifiera konstruktionerna mot ett så lågt fält som möjligt.

Transformatorn är en viktig komponent och i synnerhet dess anslutning på lågspänningssidan. Lågt placerade anslutningar är givetvis att föredra i de fall då det finns annan verksamhet ovanför transformatorn. I rapporten redovisas resultat från magnetfältsmätningar på några typer av distributionstransformatorer av storleken 800 kVA. För en Hexaformer (med kärnbenen i triangel) belastad med 1200 A på lågspänningssidan uppmättes ca 15 μT på två meters avstånd och knappt 6 μT på tre meters avstånd. Med transformatorn skärmad med en huv av 2 mm stålplåt erhöles en skärmverkan på 40 - 50 %.

För en transformortyp tillverkad av Møre Trafo AS, med lågt placerade uttag och med lågt läckfält, redovisas också en serie mätningar av magnetfältet. Vid 1100 A på lågspänningssidan uppmättes ca 10 μT en meter ovan lock på en okapslad transformator och ca 3 μT ovan en motsvarande transformator med 5 mm tjock aluminiumkapsling. Mätt på en meters avstånd från långsidan fås motsvarande värden 15 μT respektive ca 4 μT .

I rapporten behandlas även ställverksfack med låg placering av samlings-skenan och andra arrangemang för att minska magnetfältet. Man hänvisar till en rapport som beskriver hur magnetfältsnivån kan minska till en 1/10 med den här typen av åtgärder.

Två s k fallstudier beskrivs i rapporten. Den första är en nätstation som byggts om från 2 x 2000 kVA till 2 x 1000 kVA och där anslutningarna mellan transformator och ställverk utförts med flexibla skenor för att minimera magnetfältet. Väggar och tak har dessutom skärmats med aluminiumplåt. Magnetfältsnivån 0,5 m ovan tak sänktes från 2 – 10 μT före åtgärder till 0,5 – 1 μT efter åtgärder. Situationen 0,5 m från yttervägg var likartad; en sänkning från 1,5 – 5,5 μT före åtgärder till 0,5 – 1 μT efter åtgärder.

Det andra fallet som beskrivs är en ombyggnad och skärmning av ett inomhusställverk beläget våningen under ett kontorsrum. De nya ställverks-facken fick en något ändrad placering så en helt korrekt jämförelse låter sig inte göras, men reduktionen efter åtgärder blev i storleksordningen 90 %.

I den tredje rapporten i serien "Nätstation med lågt magnetfält" [6] avhandlas framförallt vilken betydelse skensystem och kablar har på magnetfältsnivån. Beräkningar redovisas för konventionella och kompakta skensystem och skillnaden är givetvis betydande. En minskning av fasavståndet från 8 cm till 0,85 cm gör att magnetfältet minskar från ca 4 μT till ca 0,4 μT på 2 meters avstånd och vid 800 A. För kabelförband typ 3 st enfas och 6 st i split-phase

konfiguration redovisas liknande beräkningar och betydande reduktion. I rapporten finns även en serie beräkningar med olika varianter på anslutning av samlingsskena. Korta strömbanor och fasarrangemang där magnetfältet från respektive fas motverkar varandra ger låga totala magnetfält.

En studie av magnetfält från kabelskåp redovisas i en rapport från Elforsk publicerad 2005 [7]. I rapporten redovisas mätningar av magnetfält invid kabelskåp; både med 4-ledarsystem och 5-ledarsystem. Resultat finns för mätningar med både stängd och med öppen frontdörr eller lucka. 0,5 m framför 4-ledarskåpen och med stängd dörr uppmättes magnetfält varierande mellan ca 0,5 μT och ca 3 μT . Framför 5-ledarskåpen uppmättes något mer p g a högre belastning; mellan ca 0,5 och ca 5 μT . Fältet avklingar ungefär lika snabbt bakom skåpen som framför dem. På 0,5 m avstånd uppmättes mellan ca 0,4 och 2 μT . Mätresultaten visar att frontdörren eller luckan har liten påverkan på fältets storlek vid mätning på avstånd överstigande 0,5 m. På kortare avstånd och framförallt mitt för skåpet begränsar frontdörren fältet med ca 50 %. Med öppen dörr och vid fasströmmar på 150, 118 och 145 A uppmättes ca 1,2 μT .

2.2 CIRE – International Conference on Electricity Distribution

Vid Tampere University of Technology har man under en längre tid studerat magnetfält i ställverksrum, kabelskåp mm. I en artikel publicerad vid CIRE konferensen i Turin 2005 redovisades mätningar runt ett kabelskåp för lågspänning [8]. Fältet, orsakat av både grundton och övertoner, hade mätts i ett antal positioner motsvarande bl a ett säkringsbyte. Det resultat som presenteras visar att övertonerna har stor betydelse för den totala fältbilden. Tyvärr ges ingen information om övertonernas relativa storlek, men det förefaller som de måste vara betydande. 50 Hz fältet runt skåpet varierar i tiden med belastningen och med avståndet till faserna. För 0,5 meters avstånd varierar B-fältet mellan 11,9 μT (vid 217 A) och 78,8 μT (vid 527 A). Det kortaste arbetsavståndet uppmättes till 0,2 m, vilket resulterade i ett 50 Hz fält framför det öppna skåpet av 133 - 168 μT vid 217 A.

Från samma konferens 2005 kommer en artikel från Italien [9] om magnetfält från ett dubbelt 132 kV kabelförband bestående av 2x3 kablar i triangelkonfiguration och symmetriskt belastat med 500 A per grupp. Artikeln fokuserar på ett kabelavsnitt där den ena 3-fasgruppen passerar i triangelform och den andra ligger horisontellt p g a att kablarna är skarvade. Fältet 1 m ovan marknivå blir betydligt högre i detta avsnitt än ovanför triangelkonfigurationerna. Med ett fasavstånd på 0,6 m mellan de skarvade kablarna, fås ett maximivärde på ca 20 μT ovanför skarvarna. I artikeln hänvisas till en gräns på 3 μT för nya installationer och man har därför undersökt olika arrangemang med aluminiumplåt för att begränsa fältet. Både plana skärmar och U-formade skärmar har utvärderats, både med hänsyn till skärmverkan och med avseende på åtkomst till kabelförbandet. En U-formad skärm, med öppningen uppåt, beräknas kunna minska magnetfältet till ca 3,5 – 5 μT beroende på sidornas höjd. Helt slutna "lådor" ger givetvis bättre skärmverkan, ner till 1 -2 μT , men betydligt försämrade åtkomst och kyleffekt.

Från nästa CIRED konferens, i Wien 2007, kommer ett antal artiklar. Författarna till den första [10] är verksamma vid staden Zürichs elektricitetsverk och har tittat på olika alternativ för att bygga om transformatorstationer. Man hänvisar inledningsvis till ett nytt krav på magnetfält "Installation limit value" på 1 μT . Detta värde skall innehållas där människor vistas mer stadigvarande, som daghem, skolor, kontor, bostäder etc. I artikeln redovisas olika lösningar, bl a omförläggning av förbandet från transformatorn till lågspänningsställverket, placeringen av transformatorns anslutningar, lågt eller högt och skärmning av ställverksskåp och transformatorer. Man konstaterar att det är möjligt att minska magnetfältet betydligt (ner till ca 3 μT) och med tämligen enkla medel, men för att nå ner till 1 μT i ett våningsplan ovanför stationen krävs en kombination av åtgärder och kostnaderna kan nå upp till 50 % av kostnaden för en helt ny station.

Två artiklar från bl a Tampere University of Technology och Helsinki Energy behandlar kategorisering av transformatorstationer och validiering av mätmetoder [11,12]. Arbetet har skett inom ramen för det s k TransCat projektet (Categorization of indoor MV/LV transformer substations according to magnetic field exposure) och har omfattat totalt 53 stationer i Finland. Avgörande för magnetfältsnivån i ett våningsplan ovanför stationen är framförallt förbandet mellan transformator och lågspänningsställverk. I drygt hälften av de studerade fallen består förbandet av skenor eller kablar och sitter nära taket. Magnetfältet har mätts på ett avstånd under förbandet motsvarande avståndet upp till golvnivå på ovanliggande våningsplan och värdena har sedan räknats om till aktuell märkström för respektive transformator. Med skenor monterade nära tak och vid full märkström fås ett magnetfält i golvnivå våningen ovanför på 105 – 337 μT , med kablar fås motsvarande värden på 4,5 – 187 μT . Med förbandet på lägre höjd eller med skärmning fås betydligt lägre fält; 2 – 38 μT .

2.3 Rapport från Cigré

I februari 2009 publicerade Cigré en guide med titeln "Mitigation techniques of power-frequency magnetic fields originated from electric power systems" [13]. I den drygt 60-sidiga skriften beskrivs fält och utbredning, principerna för skärmning och olika praktiska lösningar. Den ofta enklaste och mest kostnadseffektiva lösningen för att begränsa magnetfält från kabelförband och skenstråk är, enligt guiden, att minska fasavståndet och välja en fasplacering som medger kort fasavstånd. Triangelkonfiguration bör om möjligt väljas framför en horisontell eller vertikal konfiguration. De mycket läsvärda avsnitten om skärmning kan mycket kort sammanfattas enligt följande:

- En skärmning som omsluter det rum där man önskar lägre fält är vanligen mest effektivt. Kostnaden begränsar storleken på rummet.
- Breda skärmar är mer effektiva än smala.
- U-formade skärmar är generellt mer effektiva än plana plåtar, men mängden material ökar på detta sätt fort.

Skärmning med ferromagnetiska material

- Skärmning kan ske med ferromagnetiska material, som "shuntar" det magnetiska fältet. Vanligt stål med låg eller måttlig kolhalt kan

användas men orienterat eller icke orienterat kiseljärn (kärnplåt) har ännu bättre egenskaper. Skärmverkan ökar med ökande magnetisk permeabilitet (μ). Vid höga fältstyrkor måste mättning beaktas.

- Slutna skärmarrangemang ger generellt högre skärmverkan än öppna geometrier som plan plåt eller U-formade konstruktioner. De senare kan med skänklarna omsluta källan för fältet eller det område som skall skärmas.
- Skärmverkan minskar kraftigt med ökande avstånd mellan en plan skärm och mätpunkt. Vid avstånd större än skärmens bredd är skärmverkan marginell.
- Skärmverkan ökar med ökande tjocklek hos skärmen. Skillnaden är mest påtaglig i närområdet, med högt fält. Ökningen är likaså mest påtaglig för tunna skärmplåtar. En ökning från 1 till 2 mm har i storleksordningen samma verkan som från 2 till 10 mm.

Skärmning med material med god ledningsförmåga

- Skärmning kan också ske med material med god ledningsförmåga, som aluminium. I skärmaterialet induceras strömmar och därmed fält som motverkar det ursprungliga. Skärmverkan ökar med ökande ledningsförmåga (σ).
- Inträngningsdjupet δ är en viktig faktor vid skärmning med ledande material. På detta djup in i skärmaterialet har fältet minskat till $1/e \approx 0,37$ av det ursprungliga. Vid 50 Hz är inträngningsdjupet i aluminium ca 12 mm.
- Generellt ökar skärmverkan med ökande tjocklek hos skärmen. Vid större tjocklek än inträngningsdjupet är dock denna ökning mindre påtaglig.
- Skärmverkan minskar ej påtagligt vid avstånd mellan en plan skärm och mätpunkt större än skärmens bredd (detta till skillnad från fallet med en ferromagnetisk skärm).
- Med fördel kan en skärm byggas upp av ett ferromagnetiskt material och ett material med hög ledningsförmåga. För 3-fas konfigurationer rekommenderas att det ledande materialet placeras närmast källan för fältet.
- För skärmar i mark måste hänsyn tas till korrosion. Stålplåt kräver ytbehandling men även aluminiumplåt kan korrodera under vissa betingelser.

Mer information om olika skärmlösningar ges i avsnitt 4.2.

2.4 Standarder

Det finns ingen utgiven internationell standard som gäller specifikt magnetfält runt kablar och det finns inte heller något sådant pågående projekt. Däremot finns det en teknisk rapport för mätning och beräkning av magnetfält i och omkring ställverk för >1 kV. Likaså finns givetvis mer allmän standard för

mätning av fält och bedömning av exponeringsnivåer. För mer allmänna standarder hänvisas till IECs hemsida och speciellt då sådan standard som givits ut av arbetsgruppen TC 106.

Den ovan nämnda rapporten om ställverk heter "High-voltage switchgear and controlgear – Part 208: Methods to quantify the steady state, power-frequency electromagnetic fields generated by HV switchgear assemblies and HV/LV prefabricated substations" och betecknas IEC/TR 62271-208:2009-10 [14]. Det sägs inledningsvis att rapporten gäller för utvärdering på fabrik eller i laboratorium och att detta kan göras genom beräkning eller genom mätning.

Ställverket skall belastas med 100 % av märklaster vid mätningen, alternativt kan lasten vara lägre och mätresultaten räknas upp i motsvarande grad.

Inför mätningen skapas en referensyta runt ställverket (Reference surface). Denna täcker in alla detaljer men utjämnar också oregelbundenheter i ytan. På 20 cm avstånd ut från denna finns den yta som fältet skall mätas vid (Measurement surface, MS).

Vid mätningen skall först det högsta värdet utefter MS lokaliseras genom en grov scanning. Därefter skall fältets avtagande kartläggas längs en linje vid det uppmätta högsta värdet och vinkelrätt mot MS. Mätningen skall utsträckas så långt att fältets amplitud sjunker till 1/10 av det uppmätta värdet vid MS.

Efter mätningen skall man kontrollera att bakgrundsvärdet, utan ställverk i drift, är lägre än 1/10 av det uppmätta högsta värdet vid MS.

I rapporten ges också anvisningar för vad som bör ingå i rapporten och hur mätningarna kan presenteras.

3 Gränsvärden och riktvärden för exponering

I detta avsnitt ges en översikt av nu aktuella gräns- och riktvärden för exponering, liksom något om tidigare synsätt. Både elektriska och magnetiska fält tas upp. De förstnämnda ligger förvisso utanför rapportens ämne, men tas ändå upp som en mer allmän orientering. Även om sambandet mellan yttre fält och i kroppen inducerade storheter som strömtäthet och inre fältstyrka, ges här en kortare beskrivning.

Frågan om eventuella effekter av långtidsexponering för magnetiska fält kommer likaså att behandlas i detta avsnitt

Det har redan i inledningen till detta arbete nämnts att det internationella regelverket för exponering för lågfrekventa elektriska och magnetiska fält är under omarbetning och därmed att det nu våren 2010 saknas fastställda gränsvärden. Det förslag till nya "guidelines" som den internationella strålskyddsorganisationen ICNIRP presenterade den 29 juli 2009 [2] är nu våren 2010 det närmaste en internationell standard som det går att komma. Remisstiden för förslaget löpte ut den 31 oktober, men det torde ändå dröja en tid innan en fastställd utgåva av ICNIRP Guidelines kan publiceras. I väntan på detta får därför bedömningar av fält och exponering relateras till denna draftutgåva av ICNIRP Guidelines daterad 29 juli 2009.

I det följande ges en beskrivning av förslaget från ICNIRP, men först en kortare genomgång av den tidigare utgåvan från 1998 [1] och de EU-dokument och den svenska föreskrift som baserats på det tidigare ICNIRP-dokumentet.

Ett flertal standarder för mätning och för bedömning av olika exponeringssituationer har publicerats inom detta område och flera av dem bygger på ICNIRP Guidelines från 1998. Det är ännu oklart om dessa standarder kommer att omarbetas eller man eventuellt väljer att ta fram helt nya dokument.

3.1 ICNIRP Guidelines 1998

ICNIRP Guidelines 1998 omfattar hela frekvensområdet upp till 300 GHz, men i det följande beaktas bara området upp till 100 kHz. Riktlinjerna syftar till att skydda mot omedelbara effekter av fält, frågan om eventuella långtidseffekter behandlas alltså inte. I dokumentet definieras två typer av riktlinjer – Basic restrictions och Reference levels. Basic restrictions eller gränsvärden baseras direkt på erkänd påverkan på människokroppen och uttrycks i det lägre frekvensområdet som en strömtäthet (mA/m^2) inne i kroppen. Denna strömtäthet kan dock inte mätas direkt. Reference levels eller insatsvärden är direkt mätbara storheter, ex vis elektrisk fältstyrka (kV/m) och magnetisk flödestäthet (μT). För det lägre frekvensområdet har dessa Reference levels beräknats utifrån Basic restrictions med hjälp av förhållandevis enkla matematiska modeller. Relationen mellan Reference levels och Basic

restrictions är sådan att om aktuell exponering inte överskrider Reference levels, så överskrids inte heller Basic restrictions. Däremot, om Reference levels överskrids, så behöver ej nödvändigtvis Basic restrictions överskridas. Konsekvensen av detta blir att om Reference levels överskrids, så är det nödvändigt att kontrollera om även Basic restrictions överskrids.

I sammanfattningen över biologiska och epidemiologiska studier för frekvensområdet upp till 100 kHz sägs bl a:

"Laboratory studies on cellular and animal systems have found no established effects of low-frequency fields that are indicative of adverse health effects when induced current density is at or below 10 mA/m². At higher levels of induced current density (10-100 mA/m²), more significant tissue effects have been consistently observed, such as functional changes in the nervous system and other tissue effects."

"Measurement of biological responses in laboratory studies and in volunteers has provided little indication of adverse effects of low-frequency fields at levels to which people are commonly exposed. A threshold current density of 10 mA/m² at frequencies up to 1 kHz has been estimated for minor effects on nervous system functions. Among volunteers, the most consistent effects of exposure are the appearance of visual phosphenes and a minor reduction in heart rate during or immediately after exposure to ELF fields, but there is no evidence that these transient effects are associated with any long-term health risk."

Följande värden gäller för Basic restrictions eller gränsvärden:

Frekvensområde	Arbetstagare (mA/m ²)	Allmänheten (mA/m ²)
Gränsvärde vid 50 Hz	10 mA/m ²	2 mA/m ²
Gränsvärde vid:		
f = 1 Hz - 4 Hz	40/f	8/f
f = 4 Hz – 1 kHz	10	2
f = 1 kHz – 400 kHz	f/100	f/500

Tabell 1. Basic restrictions eller gränsvärden, ICNIRP 1998 [1].

Skillnaden i gränsvärde motiveras av att gruppen arbetstagare anses vara medveten om sin exponering och skall ha möjlighet att skydda sig mot denna och kunna begränsa varaktigheten av en exponering. Allmänheten, däremot, är en inhomogen grupp som kan inkludera särskilt känsliga individer som barn, gamla och personer som är påverkade av medicinering och av implantat.

Utifrån gränsvärdet har de elektriska och magnetiska fälten beräknats (referensnivåer eller insatsvärden). Detta har skett under antagandet om maximal koppling mellan yttre fält och inre strömtäthet.

Följande referensnivåer eller insatsvärden gäller:

Frekvensområde	Arbetstagare	
	B- fält (μT)	E-fält (V/m)
Insatsvärde vid 50 Hz	500 μT	10 000 V/m
Insatsvärde vid $f = 1 - 8 \text{ Hz}$	$2 \times 10^5/f^2$	20 000
$f = 8 - 25 \text{ Hz}$	$2,5 \times 10^4/f$	20 000
$f = 0,025 - 0,82 \text{ kHz}$	$25/f$	$500/f$
$f = 0,82 - 65 \text{ kHz}$	30,7	610
$f = 0,065 - 1,0 \text{ MHz}$	$2,0/f$	610

Tabell 2. Referensnivåer eller insatsvärden för arbetstagare, ICNIRP 1998 [1].

Frekvensområde	Allmänheten	
	B- fält (μT)	E-fält (V/m)
Insatsvärde vid 50 Hz	100 μT	5 000 V/m
Insatsvärde vid $f = 1 - 8 \text{ Hz}$	$4 \times 10^4/f^2$	10 000
$f = 8 - 25 \text{ Hz}$	$5 000/f$	10 000
$f = 0,025 - 0,8 \text{ kHz}$	$5/f$	$250/f$
$f = 0,8 - 3 \text{ kHz}$	6,25	$250/f$
$f = 3 - 150 \text{ kHz}$	6,25	87

Tabell 3. Referensnivåer eller insatsvärden för allmänheten, ICNIRP 1998 [1].

3.2 Riktlinjer från EU och från Strålskyddsinstitutet

ICNIRP Guidelines 1998 kom att ligga till grund för två EU-dokument och för olika nationella föreskrifter, bl a en från det svenska Strålskyddsinstitutet.

Det första EU-dokumentet är en Rådets rekommendation daterad den 12 juli 1999 om begränsning av allmänhetens exponering för elektromagnetiska fält 0 Hz–300 GHz [15]. Begränsningarna i denna innehåller Allmänhetens värden i ICNIRP 1998, med tillägg av värden för 0 - 1 Hz. Basic restrictions eller gränsvärden kallas i detta dokument för Grundläggande begränsning. Denna Rådets rekommendation kom att ligga till grund för den svenska föreskriften SSI FS 2002:3 Statens strålskyddsinstituts allmänna råd om begränsning av allmänhetens exponering för elektromagnetiska fält [16]. Det sägs i denna föreskrift att fält som medför att de grundläggande begränsningarna överskrids, inte *bör* förekomma i något område som allmänheten vistas i. Likaså sägs att fält överstigande referensnivåerna inte *bör* förekomma i något

område som allmänheten vistas i. Det sägs också att de allmänna råden inte skall itillämpas på arbetstagare som exponeras i sin yrkesroll. För sådan exponering gäller i stället föreskrifter från Arbetsmiljöverket.

Den 29 april 2004 antogs ett EU-direktiv [17] med minimikrav för att skydda arbetstagares mot sådana hälso- och säkerhetsrisker som uppstår eller kan uppstå vid exponering för elektromagnetiska fält under arbetet (0 Hz till 300 GHz). Direktivet kom att helt baseras på ICNIRP's värden för arbetstagare och kompletterades bl a med ett avsnitt om arbetsgivarens skyldigheter. I direktivets stadgades att medlemsländerna senast fyra år efter dess offentliggörande skulle ikraftsätta sådana bestämmelser som ansågs nödvändiga för att följa direktivet.

EU-direktivet kom att utsättas för mycket hård kritik, bl a från den medicintekniska sidan, och som ett resultat av detta senarelades införandetidpunkten för EU-direktivet med fyra år, fram till den 30 april 2012 [18].

3.3 ICNIRP 2009

Viss kritik kom också att riktas mot det grundläggande dokumentet – ICNIRP Guidelines från 1998 – och olika tänkbara förändringar i en ny utgåva hade redan hunnit diskuteras en längre tid när en ny draft till ICNIRP Guidelines publicerades den 29 juli 2009 [2]. Den nya utgåvan omfattar bara ELF-området, d v s frekvensområdet 1 Hz - 100 kHz och skiljer sig även i övrigt på vissa punkter från den tidigare. (Det pågår även arbete med riktlinjer för det högre frekvensområdet). I den nya utgåvan har man som tidigare bara beaktat erkända och omedelbara effekter av elektriska och magnetiska fält. En sådan diskuterad och erkänd effekt är stimulans av det centrala nervsystemet och man nämner i den nya utgåvan en miniminivå för sådan stimulans på 100 mV/m, räknat som lokal elektrisk fältstyrka i kroppen (in situ fältstyrka). Mest etablerad är den påverkan på det visuella systemet som betecknas fosfener och som anses kunna uppträda vid en lokal in situ fältstyrka från 50 till 100 mV/m. Precis som i den tidigare utgåvan, baseras angivna gränsvärden enbart på erkända omedelbara effekter och inte på några eventuella långtidseffekter, som olika former av cancer eller neurodegenerativa sjukdomar.

Ett av de viktigaste avsnitten i den nya utgåvan handlar om dosimetri, d v s sambandet mellan ett yttre elektriskt eller magnetisk fält och en därav beroende storhet inne i kroppens vävnader. I denna nya utgåva uttrycks den inre storheten som en elektrisk fältstyrka in situ. Detta uttryckssätt är nytt för ICNIRP Guidelines men ingalunda inom den vetenskapliga litteraturen i övrigt. Under 1998 publicerades tre artiklar av en forskargrupp vid University of Victoria, Kanada, där begreppen strömtäthet och elektrisk fältstyrka in situ användes parallellt. I april 1998 publicerades en artikel i IEEE Transactions on Power Delivery [19] med titeln High-Resolution Organ Dosimetry for Human Exposure to Low-Frequency Electric Fields. Denna följdes i maj samma år av en artikel i IEEE Transactions on Magnetism [20] med titeln High-Resolution Organ Dosimetry for Human Exposure to Low-Frequency Magnetic Fields och i maj kom även en artikel i Physics in Medicine and Biology [21] med titeln Effects of skeletal muscle anisotropy under 60 Hz uniform magnetic field exposure.

Det visas i dessa artiklar att båda storheterna är användbara, men att fältstyrkan in situ är mindre känslig för kroppens lokala konduktivitetsvariationer. Resultatet blir därigenom mer stabilt och de stora skillnader som strömtätheten kan uppvisa blir betydligt mindre påtagliga med fältstyrkan in situ som mätstorhet. Beräkningsmässigt är det givetvis ingen större skillnad då den ena storheten kan beräknas ur den andra med hjälp av Ohms lag. Dessa artiklar kom sedan att följas av allt fler som ifrågasatte valet av strömtäthet som en lämplig storhet och övergången till fältstyrka in situ får därför betecknas som ett väl genomarbetat och närmast naturligt val.

Oavsett valet av mätstorhet, strömtäthet eller fältstyrka in situ, är sambandet mellan yttre fält och inre storhet en mycket svår fråga. Tidiga beräkningar, fram till mitten av 90-talet, baserades på mycket enkla geometriska modeller. Under den andra hälften av 90-talet gavs så möjlighet att utnyttja detaljerade modeller med kroppens organ modellerade med rimlig form och konduktivitet. De tre artiklarna ovan från 1998 bygger alla på modellen UVic, som är uppbyggd av 1 736 873 kubiska celler med sidlängden 3,6 mm. I den nya utgåvan av ICNIRP Guidelines stöder man sig på tre andra artiklar från senare år som ger resultat från beräkningar med modeller med en upplösning bättre än 4 mm.

Den första av de tre och kanske den mest intressanta, är en artikel från 2005 av Peter Dimbylow med titeln Development of the female voxel phantom NAOMI, and its application to calculations of induced current densities and electric fields from applied low frequency magnetic and electric fields [22]. I artikeln redovisas resultat från beräkningar med två modeller, dels den kvinnliga modellen NAOMI (1,63 m/60 kg) och dels den manliga NORMAN (1,76 m/73 kg). Båda modellerna är uppbyggda av kubiska celler med ungefär 2 mm sida. NAOMI är uppbyggd av ungefär 7,75 miljoner celler fördelade på 41 organ/vävnader med fastställd konduktivitet. I den något större NORMAN finns ungefär 8,3 miljoner celler fördelade över 38 olika organ/vävnader. De båda modellerna har exponerats för ett yttre homogent fält och inre storheter har sedan beräknats. I samtliga beräkningsfall har modellerna varit upprätt stående, i vissa fall med fötterna i kontakt med jord och i andra fall isolerade från jord. Det elektriska fältet har alltid varit riktat vertikalt, längs med kroppen, medan det magnetiska fältet har varit riktat både vertikalt, från sidan och bröst-rygg. För in situ fältstyrkan redovisas den 99:e percentilen, d v s ett värde som överskrider endast i 1 % av ingående beräkningsceller i organet samt i vissa fall även medelvärdet och den maximala fältstyrkan i respektive organ. Orsaken till att använda den 99:e percentilen framför det maximala värdet, är den att det senare kan vara kraftigt påverkat av diverse ofullkomligheter i den matematiska behandlingen.

I Tabell 4 återges Dimbylows beräknade värden för NAOMI vid 50 Hz. Värden har beräknats för ryggmärgen (spinal cord), för hjärnans vita substans (white matter), för hjärnans grå substans (grey matter) och för näthinnan (retina). Vid beräkning med det elektriska fältet är modellen jordad, vilket ger upphov till högst fält in situ. I detta fall fås högst fältstyrka i ryggmärgen; 2,92 mV/m vid ett yttre fält av 1 kV/m. Vid motsvarande beräkning med ett magnetiskt fält, riktat från sida-sida, fås högst fältstyrka i hjärnans vita substans; 31,4 mV/m vid 1 mT.

Tabell 5 återger resultatet vid beräkningar med både NAOMI och NORMAN och med ett magnetiskt fält riktat bröst-rygg (AP), sida-sida (LAT) och vertikalt (top). Beroende på fältets riktning fås högsta fältstyrka i olika organ. Mest kritisk är exponering sida-sida, med en fältstyrka in situ på 48,6 mV/m vid 1 mT.

Organ	Applied electric field grounded conditions (mV/m per kV/m)			Applied magnetic field from side to side (LAT) (mV/m per mT)		
	Mean	99 th percentile	Maximum	Mean	99 th percentile	Maximum
Spinal cord (Ryggmärg)	1,16	2,92	4,88	8,90	27,0	53,0
White matter (Vit hjärnsubstans)	0,781	2,02	6,13	10,1	31,4	82,5
Grey matter (Grå hjärnsubstans)	0,474	1,62	4,85	8,04	30,2	74,8
Retina (Näthinna)	0,314	0,552	0,582	6,69	13,5	15,1

Tabell 4. Inducerad fältstyrka i NAOMI vid 50 Hz. Återgiven från ref [22], Table 5. Homogent fält. Fetstil anger maxvärden.

Geometry	Electric field for 99th percentile voxel value in mV/m per mT		
	Brain	Spinal cord	Retina
NAOMI, AP (front-back)	25,7	17,7	6,98
NORMAN, AP (front-back)	30,7	29,7	7,05
NAOMI, LAT (side-side)	31,4	27,0	13,5
NORMAN, LAT (side-side)	33,0	48,6	14,6
NAOMI, TOP (vertical)	25,1	8,60	6,90
NORMAN, TOP (vertical)	22,1	23,0	10,2

Tabell 5. Elektrisk fältstyrka in situ uttryckt som 99:e percentil och vid ett yttre magnetiskt fält av 1 mT. Återgiven från ref [22], Table 6. Homogent fält. Fetstil anger maxvärden.

Exponering för ett yttre elektriskt fält redovisas i Tabell 6. Modellerna är både jordade via fötterna (GRO) och isolerade från jord (ISO). Högst fältstyrka in situ fås med en NORMAN som har fötterna i kontakt med marken; 3,42 mV/m vid 1 kV/m.

Geometry	Electric field for 99th percentile voxel value in mV/m per kV/m		
	Brain	Spinal cord	Retina
NAOMI, GRO	2,02	2,92	0,552
NORMAN, GRO	1,65	3,42	0,514
NAOMI, ISO	1,22	1,40	0,336
NORMAN, ISO	0,811	1,63	0,262

Tabell 6. Elektrisk fältstyrka in situ uttryckt som 99:e percentil och vid ett yttre elektriskt fält av 1 kV/m. Återgiven från ref [22], Table 7. Homogent fält. Fetstil anger maxvärden.

Den andra av de utpekade artiklarna publicerades i Health Physics 2007 och har Bahr, Bolz och Hennes som författare [23]. För beräkningarna har man nyttjat en modell med 40 olika organ/vävnader och med en geometrisk upplösning av 1x1x1 mm. Vissa beräkningar har även upprepats med en "nerskalad" modell motsvarande ett 5-årigt barn (109 cm). De resultat som presenteras är fältstyrkans maxvärden i respektive organ. Stor vikt ägnas att jämföra de numeriskt beräknade resultaten med analytiska beräkningar och med motsvarande resultat från andra forskare.

I Tabell 7 visas resultat från en beräkning med ett jordad modell i ett vertikalt och homogent 50 Hz elektriskt fält (E_z) och med en modell exponerad för ett 50 Hz magnetfält riktat bröst-rygg.

Exposure field	E (mV/m)
$E_z = 5 \text{ kV/m}$	12,8 (Grey matter)
$E_z = 5 \text{ kV/m}$	8,1 (White matter)
$H_y = 80 \text{ A/m}$, $B = 100 \text{ } \mu\text{T}$	2,24 (Grey matter)
$H_y = 80 \text{ A/m}$, $B = 100 \text{ } \mu\text{T}$	2,38 (White matter)

Tabell 7. Beräknad elektrisk fältstyrka, maxvärde i respektive organ. Homogent fält. Jordad modell. Återgiven från ref [23].

Tabell 8 återger resultaten från beräkning av fältstyrkan vid exponering för ett vertikalt 50 Hz elektriskt fält och motsvarande för ett magnetiskt fält riktat bröst-rygg återges i Tabell 9. I båda tabellerna finns en jämförande beräkning med en modell motsvarande ett 5-årigt barn.

Tissue	E (mV/m), maximum value at $E_z = 5 \text{ kV/m}$, 50 Hz	
	Adult (187 cm)	Child (109 cm)
Grey matter	8,91	8,57
White matter	5,69	5,48

Tabell 8. Elektrisk fältstyrka vid 5 kV/m, 50 Hz. Homogent fält. Ojordad modell. Återgiven från ref [23].

Tissue	E (mV/m), maximum value at $H_y = 80 \text{ A/m}$, 50 Hz	
	Adult (187 cm)	Child (109 cm)
Grey matter	2,23	1,3
White matter	2,38	1,38

Tabell 9. Elektrisk fältstyrka vid $H = 80 \text{ A/m}$ ($B = 100 \mu\text{T}$), 50 Hz. Homogent fält. Återgiven från ref [23].

I den tredje artikeln, av Akimasa Hirata m fl, publicerad i Radiation Protection Dosimetry 2009 [24], ges resultat från beräkningar med modeller motsvarande en japansk man och en japansk kvinna. Modellerna är mindre än NORMAN och NAOMI, "mannen" TARO är 1,728 m lång och väger 65,0 kg och "kvinnan" HANAKO är 1,6 m lång och väger 53,0 kg. Modellerna har exponerats för ett homogent 50 Hz magnetiskt fält riktat bröst-rygg, sida-sida respektive vertikalt och fältstyrkan in situ har beräknats och uttryckts som maxvärden och 99:e percentil. Resultatet visar i stort sett genomgående på lägre in situ fältstyrkor hos de japanska modellerna jämfört med NORMAN och NAOMI. Skillnaden förklaras med att de japanska modellerna har mindre omkrets (tunnare kroppsform) och till viss del med detaljskillnader mellan modellerna.

Materialet från Dimbylow och Bahr m fl kan sammanfattas enligt följande:

Beräknade in situ fältstyrkor avseende exponering för homogena fält finns för vertikala elektriska fält, jordade och ojordade modeller. Med en jordad modell fås högre in situ fältstyrka, men effekten av kroppslängden (NAOMI jfm NORMAN) är inte lika given utan varierar från organ till organ. Resultaten avseende exponering för homogena magnetfält, visar att högst värden i

kritiska organ fås vid exponering för ett fält riktat sida-sida. I tabellerna 10 och 11 ges en översikt av materialet.

Yttre fält	Fältstyrka in situ (mV/m)		Kommentar
	Jordad modell	Ojordad modell	
Elektriskt fält, 1 kV/m, 50 Hz, homogent, vertikalt	3,42	1,63	Dimbylow [22]. NORMAN. Värde för ryggmärgen, 99 th percentil
	2,56	1,78	Bahr [23]. Maxvärde för hjärnans grå substans.

Tabell 10. Översikt elektriskt fält och in situ fältstyrka.

Yttre fält	Fältstyrka in situ (mV/m)			Kommentar
	Exponering bröst-rygg	Exponering sida-sida	Exponering vertikalt	
Magnetiskt fält, 1 mT, 50 Hz, homogent	30,7			Dimbylow [22]. NORMAN. Värde för hjärnan. 99 th percentil
		48,6		Dimbylow [22]. NORMAN. Värde för ryggmärgen. 99 th percentil
			25,1	Dimbylow [22]. NAOMI. Värde för hjärnan. 99 th percentil
	23,8			Bahr [23]. Maxvärde för hjärnans vita substans.

Tabell 11. Översikt magnetiskt fält och in situ fältstyrka.

I den nya draftutgåvan av ICNIRP Guidelines sammanfattas dessa litteraturuppgifter enligt följande:

Elektriskt fält 50 Hz, 1 kV/m: max in situ fältstyrka 3 - 4 mV/m.

Magnetiskt fält 50 Hz, 1 mT: max in situ fältstyrka 50 - 80 mV/m.

Angivna 3 - 4 mV/m per kV/m kan synas riktigt för en modell eller människa i kontakt med jord, men 2 mV/m per kV/m borde likväl kunna anses vara rimligt för en kropp isolerad från jord. Möjligen kan detta komma att diskuteras vidare i den slutgiltiga versionen av ICNIRP Guidelines. Den övre gränsen för intervallet för magnetiskt fält är inte lika självklar. 80 mV/m per mT ligger väl över redovisade 99:e percentiler. Möjligen har man här valt att inkludera även maxvärden från Dimbylow (82,5 mV/m för NAOMI, white matter), men förhoppningsvis får detta en bättre förklaring i den slutgiltiga utgåvan.

I avvaktan på den slutgiltiga utgåvan är det dock de angivna intervallen som gäller och huruvida hänsyn får tas till jordade eller ojordade förhållanden eller till vilken riktning det magnetiska fältet har är ännu en öppen fråga.

I den nya utgåvan används begreppen Basic restrictions och Reference levels precis som tidigare. Basic restrictions baseras på direkt och erkänd påverkan på det centrala nervsystemet och Reference levels utgörs av motsvarande mätbara storheter.

Vid beräkning av in situ fältstyrkan kommer resultatet att vara kraftigt beroende av upplösningen i modellen. Användningen av 99:e percentilen i stället för det absoluta maxvärdet i ett organ är en möjlighet att råda bot på detta problem. I den nya utgåvan av Guidelines har man valt en annan lösning och rekommenderar att in situ fältstyrkan skall räknas som medelvärde av fältet i en kub med sidan 5 mm.

För Basic restrictions och för personer som exponeras för fält i sitt ordinarie arbete (occupational exposure), inom frekvensområdet 10 Hz – 100 Hz, sägs att den elektriska fältstyrkan skall begränsas till 100 mV/m i vävnad som hör till det centrala nervsystemet. För allmänheten införs en säkerhetsfaktor på 5, vilket ger motsvarande Basic restriction på 20 mV/m. Denna lägre nivå motiveras av gruppens varierande ålder, hälsotillstånd och att den i allmänhet är mindre medveten om sin exponering än arbetstagarna.

Grupp	Elektrisk fältstyrka in situ (rms)	
Frekvensområde	Arbetstagare (V/m)	Allmänheten (V/m)
Gränsvärde vid 50 Hz	100 mV/m	20 mV/m
Gränsvärde vid:		
f = 1 Hz- 10 Hz	1/f	0,2/f
f = 10 Hz – 100 Hz	0,1	0,02
f = 100 Hz – 200 Hz	$1 \times 10^{-3} \times f$	$0,2 \times 10^{-3} \times f$
f = 200 Hz – 1000 Hz	0,2	0,04
f = 1 kHz – 100 kHz	$2 \times 10^{-4} \times f$	$4 \times 10^{-5} \times f$

Tabell 12. Basic restrictions eller gränsvärden enligt ICNIRP Guidelines draft 2009 [2].

Baserat på Basic restrictions har man beräknat motsvarande mätbara storheter – Reference levels. Man har antagit en maximal koppling mellan yttre fält och in situ fältstyrka, d v s högsta skyddsnivå och att det yttre fältet är homogent över kroppen. För området upp till 100 kHz ger också Reference levels ett skydd mot påverkan av kontaktströmmar.

Enligt den nya utgåvan skall inverkan av de elektriska och magnetiska fältkomponenterna adderas för kontroll mot Basic restrictions, men det sägs inte hur detta skall ske. Framförallt riktningen av komponenterna kommer att variera i olika delar av kroppen, beroende på kroppens anatomi och det yttre fältets riktning. Addition utan hänsyn till vinkelskillnad eller fasläge är dock förmodligen den enda realistiska möjligheten.

Frekvensområde	Arbetstagare	
	B- fält (μT)	E-fält (V/m)
Insatsvärde vid 50 Hz	500 μT	10 000 V/m
Insatsvärde vid $f = 1 - 10 \text{ Hz}$	$2,5 \times 10^5/f^2$	20 000
$f = 10 - 25 \text{ Hz}$	$2,5 \times 10^4/f$	20 000
$f = 0,025 - 0,1 \text{ kHz}$	$25/f$	500/f
$f = 0,1 - 0,4 \text{ kHz}$	250	5000
$f = 0,4 - 1 \text{ kHz}$	$100/f$	2000/f
$f = 1 - 100 \text{ kHz}$	100	2000

Tabell 13. Referensnivåer eller insatsvärden för arbetstagare, ICNIRP 2009. (Ostörda rms värden) [2].

Frekvensområde	Allmänheten	
	B- fält (μT)	E-fält (V/m)
Insatsvärde vid 50 Hz	100 μT	5 000 V/m
Insatsvärde vid $f = 1 - 10 \text{ Hz}$	$5 \times 10^4/f^2$	10 000
$f = 0,01 - 0,025 \text{ kHz}$	$5/f$	10 000
$f = 0,025 - 0,1 \text{ kHz}$	$5/f$	250/f
$f = 0,1 - 0,4 \text{ kHz}$	50	250/f
$f = 0,4 - 1 \text{ kHz}$	$2/f$	250/f
$f = 1 - 3 \text{ kHz}$	20	250/f
$f = 3 - 100 \text{ kHz}$	20	87

Tabell 14. Referensnivåer eller insatsvärden för allmänheten, ICNIRP 2009. (Ostörda rms värden) [2].

Liksom i tidigare utgåva finns en begränsning för kontaktströmmar, d v s sådana urladdningsströmmar som kan uppstå vid kontakt med ett föremål på annan potential. Denna begränsning är inte satt för att skydda mot alla nivåer av kontaktströmmar, utan enbart mot direkt smärtsamma upplevelser.

Grupp	Frekvensområde	Maximal kontaktström (mA)
Arbetstagare	$f = >0 - 2,5 \text{ kHz}$	1,0
	$f = 2,5 - 100 \text{ kHz}$	$0,4 \times f$
Allmänheten	$f = >0 - 2,5 \text{ kHz}$	0,5
	$f = 2,5 - 100 \text{ kHz}$	$0,2 \times f$

Tabell 15. Referensvärden för kontaktströmmar enligt ICNIRP 2009 [2].

Vad det gäller bedömning av samtidig exponering för fält med flera frekvenser gäller som tidigare att beräknade in situ fältstyrkor skall vägas mot aktuellt värde på Basic restriction och sedan adderas. Är summan mindre eller lika med 1, är den sammanvägda exponeringen inom gränsvärdet. Samma förfarande kan tillämpas både på de elektriska och magnetiska fälten och på kontaktströmmarna.

I den nya utgåvan av Guidelines finns ett avsnitt om exponering för fält med ett större inslag av övertoner och hur inverkan av dessa skall vägas samman. Troligen kommer det här avsnittet att omarbetas och kompletteras till den slutgiltiga utgåvan och därför lämnas inte här några ytterligare kommentarer om själva texten.

I ett avslutande informativt Annex diskuteras exponering för inhomogena fält. Det sägs att det är möjligt, men ofta väl konservativt, att mäta det maximala elektriska eller magnetiska fältet i position för kroppen. Alternativt kan man mäta medelvärde över en volym motsvarande en viss kroppsdel och sedan utnyttja dosimetriska uppgifter för respektive organ och för ett homogent fält. ICNIRP hänvisar i detta fall till en artikel av Stuchly och Dawson [25]. Även med denna metod överskattas i de flesta fall in situ fältstyrkan, men avvikelserna är mer måttliga. Stuchly och Dawson har beräknat inducerade storheter på detta sätt och jämfört resultatet med motsvarande utgått från ett inhomogent fält. Man har då funnit att in situ fältstyrkan i hjärnan kan överskattas med upp till 60 %.

3.4 Riktlinjer avseende akuta effekter i sammandrag

Sammanfattningsvis ger de här ovan presenterade dokumenten från ICNIRP, EU och det svenska Strålskyddsinstitutet (SSI) följande vägledning vad det gäller exponering för elektriska och magnetiska fält:

- Riktvärden finns avseende akuta biologiska effekter. Någon egentlig begränsning avseende långtidsexponering finns däremot inte.
- För bedömning av enklare exponeringsfall finns Reference values i form av mätbara storheter som magnetisk flödestäthet (μT) och elektrisk fältstyrka (kV/m).
- För bedömning mot Basic restrictions finns relationstal för E- och B-fält. Det kan bli möjligt att ta hänsyn om människan har kontakt med jord eller inte.
- Skillnaden vid exponering för magnetfält av olika riktning i förhållande till människokroppen kan däremot troligen inte utnyttjas, eftersom arbetspositionen sällan kan låsas så exakt.
- Det finns referensnivåer för kontinuerliga kontaktströmmar.
- Möjlighet finns att bedöma exponeringen vid inhomogena magnetfält.
- Det saknas vägledning för att bedöma inverkan av elektriska fält med betydande horisontella komponenter.

3.5 Eventuella långtidseffekter av fält

Frågan om eventuella långtidseffekter av svaga elektriska och magnetiska fält har diskuterats under lång tid och mycket material har publicerats. En av de första mer kända artiklarna är Nancy Wertheimers och Ed Leepers artikel [26] "Electrical wiring configurations and childhood cancer" från 1979. Ämnet har här i Sverige bl a bevakats för Elforsks räkning av Rolf Lindgren, först ensam och under de senare åren tillsammans med Petra Lundberg. Under de allra senaste åren har ämnet bevakats av Björn Cedervall, som även studerat de kemisk-fysikaliska förutsättningarna för svaga fälts påverkan på DNA-strukturen. Den följande översikten om långtidseffekter är till stora delar hämtad från Lindgrens och Lundbergs sammanfattande rapport om EMF-forskningen 1993-2003 [27].

Detta är ett generellt mycket komplicerat område som huvudsakligen bygger på statistisk behandling av olika sjukdomstillstånd hos stora befolknings- eller yrkesgrupper. En särskilt påtaglig svårighet är bristen på kontroll över beroende riskfaktorer och som kan minska tilltron till de slutsatser som dras.

Följande sjukdomstillstånd eller problemställningar diskuteras i samband med långtidseffekter:

Cancer i olika former har varit föremål för en mycket omfattande forskning och flera epidemiologiska studier visar på ett statistiskt samband mellan långtidsexponering för lågfrekventa magnetfält och cancer. Det tydligaste sambandet gäller leukemi hos barn.

Riskökningen är dock generellt liten och ännu saknas trovärdiga mekanismer. Frågan har tidigare även behandlats av Anders Ahlbom, verksam vid

Karolinska Institutet i Stockholm och aktiv inom ICNIRP. Han publicerade tillsammans med kollegor inom ICNIRP i slutet av 2001 en mycket omfattande sammanställning av den epidemiologiska litteraturen inom EMF-området [28] och även han pekar på ett visst statistiskt samband mellan lågfrekventa magnetfält $>0,4 \mu\text{T}$ och leukemi hos barn.

Förändringar i melatoninhalten är också en form av påverkan som diskuterats flitigt under en längre tid. Melatonin är ett hormon som styr kroppens sömnrhythm och en minskning av melatoninhalten i blodet skulle kunna påverka dygnsrytmen. Detta har tagits upp som en förklaring till den s k ställverksjukan som drabbat vissa enstaka personer som exponerats under en längre tid för höga elektriska fält. Sambandet mellan magnetiska fält och halten melatonin i blodet har också studerats, men med varierande resultat.

Om kognitiva funktioner och påverkan på det centrala nervsystemet skriver Lundberg och Lindgren: *"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."*

Eventuella reproduktionsstörningar orsakade av lågfrekventa magnetfält har studerats både hos djur och hos människor, men utan att man funnit några entydiga och säkra samband däremellan. Det finns, både vad det gäller djur och människor, undersökningar som visar på statistiska samband och undersökningar som inte resulterar i något samband. Bilden är således splittrad, men sammanfattande översiktsartiklar konstaterar att det inte finns säkra statistiska samband mellan lågfrekventa magnetfält och reproduktionsstörningar.

Lundberg och Lindgren lyfter fram påverkan på immunsystemet som ett "potentiellt" viktigt område. Studier på råttor och möss har nämligen visat att en exponering skall initialt kunna verka aktiverande på immunsystemet, medan en längre tids exponering skall kunna verka begränsande. Även studier på människor pekar i samma riktning.

Avslutningsvis tar man i sin rapport upp forskningen om olika fältvariabler. Med detta menas inte bara fältets amplitud, utan också fältets variationer i tiden, frekvensinnehåll, intermittenta fält och fönstereffekter vad det gäller amplitud och frekvens. I synnerhet fönstereffekten försvårar naturligtvis möjligheten att ställa upp gränsvärden för långvarig exponering.

Långtidseffekter av kraftfrekventa elektriska och magnetiska fält har studerats sedan början av 70-talet, utan att man kunnat nå fram till några mer säkerställda samband och mekanismer. Det innebär dock inte med nödvändighet att sambanden saknas, men frågan är med säkerhet mycket komplex.

I sammanhanget kan nämnas att de svenska myndigheterna Arbetarskyddstyrelsen, Boverket, Elsäkerhetsverket, Socialstyrelsen och Statens strålskyddsinstitut säger att kunskapen inte är tillräcklig för att fastställa gräns-

värden, men man rekommenderade gemensamt redan 1996 följande s k försiktighetsprincip [29]:

"Om åtgärder, som generellt minskar exponeringen, kan vidtas till rimliga kostnader och konsekvenser i övrigt bör man sträva efter att reducera fält som avviker starkt från vad som kan anses normalt i den aktuella miljön. När det gäller nya elanläggningar och byggnader bör man redan vid planeringen sträva efter att utforma och placera dessa så att exponeringen begränsas."

Det sägs vidare att det övergripande syftet med försiktighetsprincipen "är att på sikt reducera exponeringen för magnetfält i vår omgivning för att minska risken att människor eventuellt kan skadas".

Om storleken av magnetfält och vad som kan anses vara normalt i olika miljöer sägs vidare:

"Med magnetfältsnivån i aktuell miljö avses magnetfältsnivån i områden där människor återkommande kan förväntas vistas under längre tid, exempelvis bostäder, skolor, daghem och arbetsplatser. Med normal magnetfältsnivå avses det, efter beräkning eller flera mätningar, erhållna genomsnittsvärdet på magnetfältet i den aktuella miljön vid sådana förhållanden som kan anse återspegla fältnivån under lång tid. Mätningar invid punktkällor med snabbt avklingande fält skall inte anses återspegla magnetfältsnivån annat än om individer kan förväntas vistas invid punktkällan en stor del av dygnet eller arbetsdagen."

För att erhålla en rättvisande bild av magnetfältsnivån måste mätning ske på ett tillräckligt stort antal platser i rummet och vid ett tillräckligt antal tidpunkter för att resultatet skall vara reproducerbart. Det är viktigt att mätmetoderna är dokumenterade. För kraftledningar kan beräkningar av fälten i många fall vara att föredra i stället för mätningar."

Magnetfälten i bostäder och daghem belägna långt ifrån kraftledningar är i allmänhet mycket låga. Medianvärdet för bostäder och daghem i större städer är cirka 0,1 μT (mikrotesla). I mindre städer och på landsbygden är värdena ungefär hälften. I storstadsområdena har cirka 10 procent av bostäderna minst ett rum med ett magnetfält över 0,2 μT . Nära kraftledningar och transformatorstationer är magnetfälten högre. Mitt under en kraftledning kan det vara ungefär 10 μT . Man beräknar att cirka 0,5 procent av bostadsbeståndet har ett magnetfält över 0,2 μT på grund av närhet till elektriska ledningar av olika typer."

Mätningar har gjorts för ett stort antal yrkeskategorier på deras arbetsplatser. Medianvärdet för dessa var cirka 0,2 μT . I många industrimiljöer varierar naturligt nog värdena avsevärt. Det högsta dagsmedelvärdet, 1,1 μT , uppmättes för yrkesgruppen svetsare. För vissa individer eller arbets-situationer kan, kortvarigt, värden på hundratals μT förekomma."

Frågan om magnetfält i allmän miljö behandlas i en broschyr utgiven 2009 av i princip samma myndigheter som 1996. Det är nu Arbetsmiljöverket, Boverket, Elsäkerhetsverket, Socialstyrelsen och Strålsäkerhetsmyndigheten

som gemensamt givet ut en ny broschyr med titeln Magnetfält och hälsorisker [30]. Den tidigare direkta hänvisningen till Försiktighetsprincipen saknas nu och man är likaså mer generell när det gäller rekommenderade nivåer för fält. Följande utdrag är hämtat från broschyrens avslutande text under rubriken *Myndigheternas rekommendationer*:

"Eftersom hälsoeffekter från magnetfält på lång sikt inte kan uteslutas har myndigheterna valt att rekommendera en viss försiktighet, både för allmänheten och i arbetslivet.

Myndigheterna ger följande rekommendationer vid samhällsplanering och byggande, om de kan genomföras till rimliga kostnader.

- *Sträva efter att utforma eller placera nya kraftledningar och andra elektriska anläggningar så att exponering för magnetfält begränsas.*
- *Undvik att placera nya bostäder, skolor och förskolor nära elanläggningar som ger förhöjda magnetfält.*
- *Sträva efter att begränsa fält som starkt avviker från vad som kan anses normalt i hem, skolor, förskolor respektive aktuella arbetsmiljöer."*

Varken Försiktighetsprincipen från 1996 eller den senare texten från 2009 ger någon nivå för magnetfältet och detta torde vara en högst medveten skrivning. Det har dock senare publicerats material som nämner en eller flera nivåer. I det följande nämns något av det mest intressanta i detta sammanhang:

IARC (International Agency for Research on Cancer) är en internationellt sammansatt organisation inom WHO som koordinerar forskning om mekanismerna bakom cancer och om strategier för cancerkontroll.

En av IARCs uppgifter är att bedöma cancerrisken för människor som exponeras för olika faktorer (agents), blandningar av faktorer eller exponeringssituationer. Bedömningen sker genom en kritisk utvärdering av tillgängliga data i enlighet med vissa kriterier och syftar till att kunna klassa en faktor etc till en viss kategori.

Kategorierna hänför sig enbart till en bedömning av om exponeringen är cancerframkallande, inte till styrkan av sådan påverkan och inte heller till vilken mekanism som är inblandad. Det är alltså fråga om en ren risk-identifiering och inte en riskbedömning.

Vid IARCs slutgiltiga bedömning klassas faktorn etc till någon av följande kategorier:

- Grupp 1: Faktorn/blandningen/exponeringssituationen är cancerframkallande för människor, eller exponeringssituationen innefattar exponeringar som är cancerframkallande för människor. (Ex vis dioxin och tobaksrökning.)
- Grupp 2A: Faktorn etc är troligen cancerframkallande för människor, eller exponeringssituationen innefattar exponeringar som troligen är cancerframkallande för människor. (Ex vis akrylamid och UV-strålning.)
- Grupp 2B: Faktorn etc är möjligen cancerframkallande för människor, eller exponeringssituationen innefattar exponeringar som möjligen är cancerframkallande för människor. (Ex vis DDT.)
- Grupp 3: Faktorn etc kan inte klassas avseende carcinogenicitet för människor. (Ex vis fenol och kvicksilver.)
- Grupp 4: Faktorn etc är troligen inte carcinogen för människor.

I juni 2001 offentliggjorde IARC sin bedömning av "Static and extremely low-frequency (ELF) electric and magnetic fields" [31] och följande kunde då konstateras:

Statiska elektriska fält hänförs till Grupp 3.
 Statiska magnetiska fält hänförs till Grupp 3.
 Extremt lågfrekventa elektriska fält hänförs till Grupp 3.
 Extremt lågfrekventa magnetiska fält hänförs till Grupp 2B.

Till grund för denna bedömning, att de lågfrekventa magnetiska fälten möjligen är cancerframkallande för människor, ligger begränsade belägg vid epidemiologiska studier för samband mellan kronisk lymfatisk leukemi vid yrkesmässig exponering och för leukemi hos barn vid exponering i bostaden.

Bland det svenska materialet har framförallt den sk Ralf-rapporten och Miljömanualen varit vägledande. Ralf-rapporten publicerades i december 2000 av Rådet för Arbetslivsforskning [32] och i dess inledning ges några allmänna slutsatser som är väl värda att återge:

"Arbetsgruppen finner, efter en genomgång av tillgängliga forskningsresultat och av ett antal internationella utredningar att:

- *Fullgott vetenskapligt stöd saknas för andra åtgärder än dem som innefattas i de rekommendationer som utfärdats av ICNIRP och EU*
- *Vissa yrkesmässiga situationer sannolikt förekommer där dessa rekommendationer överskrids, vilket bör ses som ett viktigt tillsynsproblem*

- *Det fortfarande finns visst vetenskapligt stöd för den försiktighetsstrategi som utfärdades av fem svenska myndigheter 1996 avseende extremt lågfrekventa magnetiska fält. Motsvarande vetenskapligt stöd saknas för en utvidgning av denna försiktighetsstrategi till andra fält eller andra frekvensområden"*

Från samma år 2000 är den sk Miljömanualen, utgiven av Miljöstiftelsen för byggsektorn [33]. (Stiftelsen har bildats på initiativ av Det naturliga steget, Jacobson & Widmark, Länsförsäkringar, PEAB, Örebro kommun, Statens Fastighetsverk och Vasakronan.) Enligt Miljömanualen kan en magnetisk flödestäthet på $0,2 \mu\text{T}$ räknas som ett Bra miljöval, medan $0,5 \mu\text{T}$ är det s k Normkravet.

Avslutningsvis kan nämnas en publikation från Elsäkerhetsverket [34] där man redovisar magnetfält från olika typer av luftledningar och kabelförband, liksom kostnader för ombyggnad till konstruktioner med lägre fält. Elsäkerhetsverket föreslår att för ledningar med högre magnetfält än $x \mu\text{T}$ skall fälten reduceras till minst $0,4 \mu\text{T}$. Detta bör beaktas av kraftbolagen vid nya och förnyade koncessioner. För ledningar som har högre magnetfält än $0,4 \mu\text{T}$, men mindre än eller lika med $x \mu\text{T}$, bör berörda kommuner och kraftbolag åläggas att samarbeta för att reducera fälten ner till minst $0,4 \mu\text{T}$. Med $x \mu\text{T}$ avses här "förhållandevis höga magnetfält" eller "ännu högre" från ett fåtal kraftledningar.

3.6 Riktlinjer avseende långtidseffekter i sammandrag

I Sverige finns inget gränsvärde för långtidsexponering av svaga elektriska eller magnetiska fält. Det är inte heller sannolikt att ett sådant gränsvärde kommer att fastställas inom överskådlig tid.

Däremot finns mer eller mindre etablerade riktvärden för magnetfält som tillämpas inom olika områden. Kommuner kan tillämpa en viss praxis liksom olika företag. I dagsläget torde värdet $0,4 \mu\text{T}$ vara den vanligast förekommande, även om $0,2 \mu\text{T}$ har åberopats i vissa fall.

4 Magnetfält från kabelförband

Storleken och utbredningen av magnetfältet från ett kabelförband är givetvis av central betydelse i detta projekt. Detta finns också väl beskrivet i flera av de skrifter som nämnts i litteraturgenomgången, bl a in Cigre guiden nr 373 [13], men det finns ändå anledning att visa på magnetfältet från några enkla geometrier eller elementarfall.

Elementarfallen är en kompromiss mellan verklighetens geometrier och vad som är rimligt enkelt att beräkna. Avsikten är inte att de skall användas för att utläsa fältets storlek för en viss geometri, utan att de främst skall illustrera betydelsen av olika faktorer, som fasavstånd och skärmning av fältet.

Den valda huvudgeometrin påminner i flertalet fall om situationen med ett 3-fas kabelförband på en stege strax under taket i en källarvåning. I våningsplanet ovanför pågår någon form av verksamhet och man har intresse av att känna fältets storlek och vilka möjligheter det finns att minska fältet. Naturligtvis är även fältet i källarvåningen intressant, eftersom bl a underhållspersonal kan ha vissa arbetsuppgifter där nere.

Faserna är symmetriskt belastade med i normalfallet 1 000 A, frekvensen är 50 Hz. Då den magnetiska flödestätheten är direkt proportionell mot strömstyrkan, kan resultatet enkelt räknas för andra strömmar.

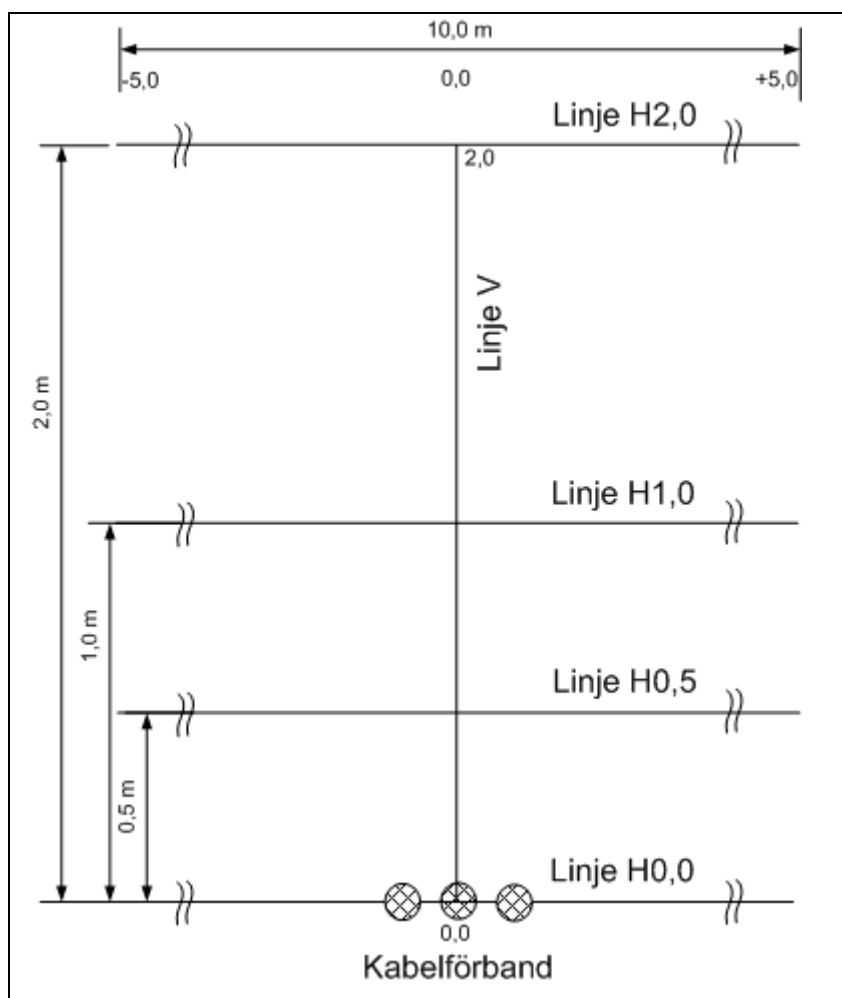
Vid beräkningarna antas strömmen gå i kablarnas centrum, men detta ger samma resultat som om strömmen är jämnt fördelad över hela ledararean.

Kablarnas ytterdiameter, inkl. isolering, är 50 mm
(motsvarar ungefär en 1-ledare 630 mm² för 12 kV)

Kablarna är horisontella, löper parallellt och är i flertalet fall oändligt långa.

Den magnetiska flödestätheten har beräknats med hjälp av programmet COMSOL Multiphysics, version 3.3. Programmet löser partiella differentialekvationer numeriskt med finita elementmetoden. Användaren ritat upp en lämplig geometri och programmet skapar därefter ett lämpligt rutnät (mesh) och ställer upp ett passande system av differentialekvationer. COMSOL Multiphysics kan som namnet antyder användas för en mängd tillämpningar och det finns ett antal olika beräkningsmoduler som kan väljas efter behov och för beräkningarna i denna rapport har den s k "AC/DC-modulen" använts. I modulen har "Quasi-statiskt" beräkningsläge valts. Detta är tillämpligt då det största avståndet i vald geometri är en bråkdel av en våglängd. I fallet med 50 Hz växelström är våglängden 6 000 km och karakteristiska geometrier maximalt något tiotal meter.

Resultatet kan presenteras grafiskt i form av konturplottar eller kurvor eller som i detta fall i form av numeriska värden för vidare behandling i Excel. I flertalet fall har den magnetiska flödestätheten beräknats dels i ett plan vinkelrätt mot kabelförbandet, för att kunna visas t ex som en konturplot, och dels längs en 2,0 m lång vertikal linje (Linje V) och fyra st 10 m långa horisontella linjer (Linje H0,5 – Linje H2,0), se Figur 1.



Figur 1. Geometri och beräkningslinjer för flertalet beräkningsfall.

4.1 Magnetfält från kabelförband utan skärm

4.1.1 En enkel 1-fas kabel

Fältet från en oändligt lång och rak ledare är det enklaste fallet att studera. I det praktiska livet är enkla ledare inte så vanliga, men vagabonderande strömmar i vattenledningar och andra ledare kan tänkas motsvara detta enkla fall.

Fältet från en enkel 1-fas kabel avtar linjärt med avståndet (R) och denna geometri kan därför användas som en referens vid jämförelse med andra, mer sammansatta geometrier.

1-fas kabeln kan också användas för att göra bedömningar om ett "värsta fall", för andra konfigurationer avtar fältet med högre potens på avståndet. Detta enkla fall används t ex i den nya standarden SS-EN 50499

"Tillvägagångssätt för bedömning av arbetstagares exponering för elektromagnetiska fält" [35] för att beskriva fältet runt strömförande ledare.

Fältet avtar linjärt med avståndet och kan för fält i luft beräknas med Biot-Savart's lag enligt:

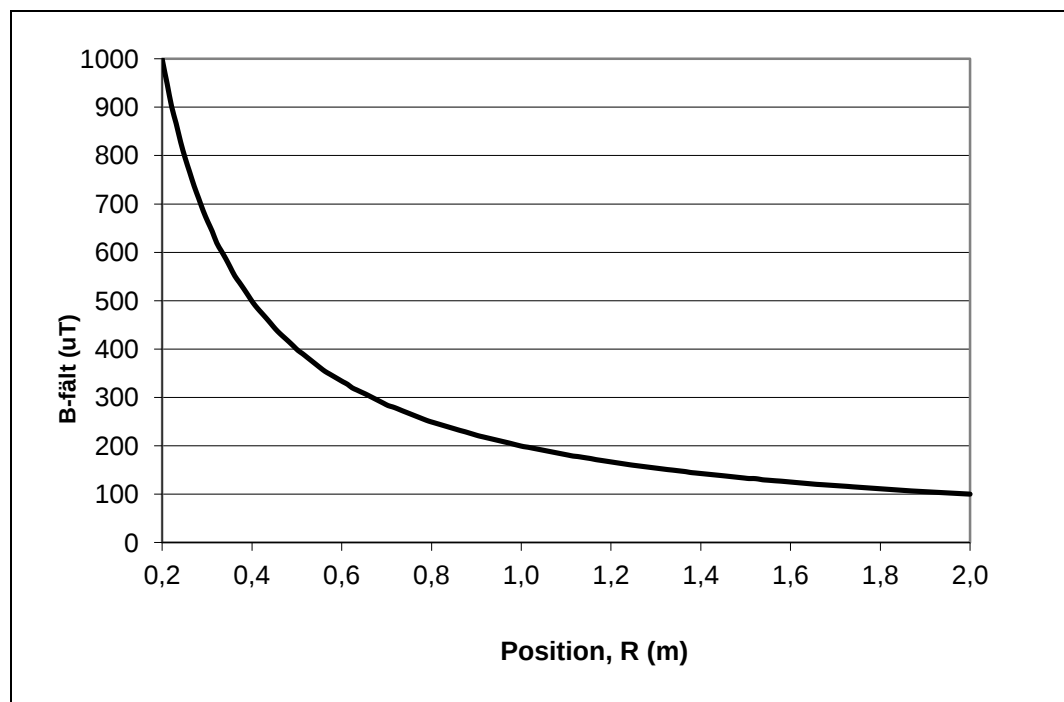
$$B = \frac{\mu_0 \times I}{2\pi \times R} \quad [1]$$

Där B = flödestätheten i T, $\mu_0 = 4 \pi 10^{-7}$, I = strömmen i A, R = avståndet mellan kabel och beräkningspunkt i m.

Vilket för fält i luft kan förenklas till

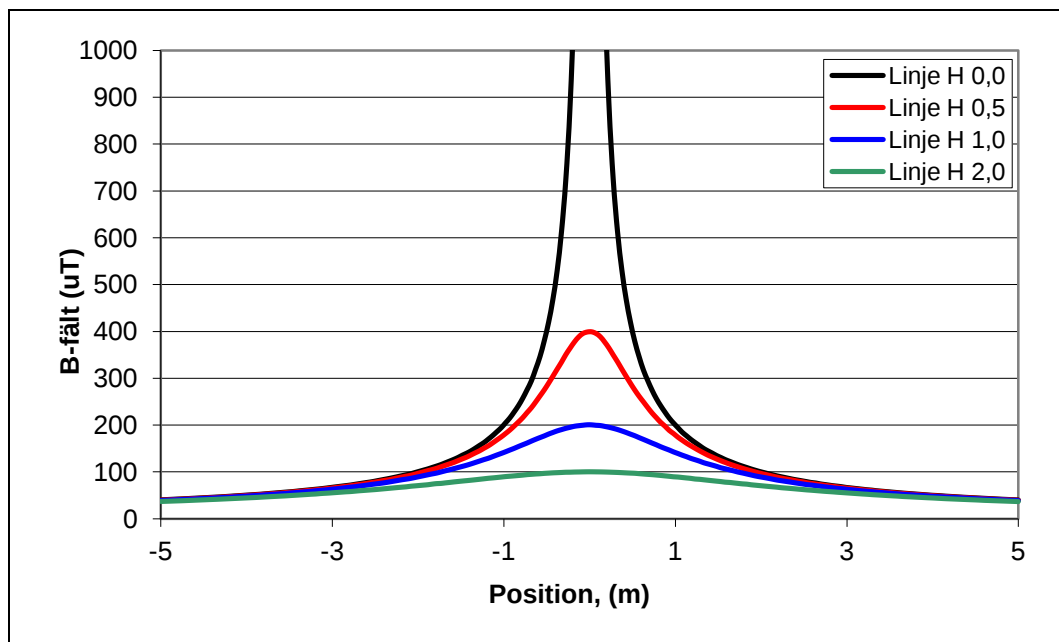
$$B = \frac{0,2 \times I}{R}, \text{ med } I \text{ i A och } R \text{ i m fås } B \text{ i } \mu\text{T}. \quad [2]$$

Figur 2 visar den magnetiska flödestätheten (B) längs en 2 m lång linje ut från kabeln (Linje V). 0-punkten ligger i kabelcentrum.



Figur 2. B-fältet från en lång rak ledare med 1 000 A. Linje V.

Utbredningen av fältet i plan ovan eller bredvid kabeln framgår av Figur 3 (Linje H 0,0; Linje H 0,5; Linje H 1,0; Linje H 2,0).



Figur 3. B-fältet längs linjer på olika avstånd från kabeln. $I = 1\,000\text{ A}$.

4.1.2 3 st 1-fas kablar i horisontell konfiguration

Tyngre kablar kan läggas på horisontell steg. I detta fall är det fråga om 1-fas kablar som ligger med olika inbördes avstånd. Kablarnas yttre diameter, inkl isolering, antas vara 50 mm och detta innebär att det kortaste avstånd mellan kabelcentrum (c-c) blir 50 mm.

Figur 4 visar fältet längs en 2 m lång vertikal linje med 0-punkten i förbandets mittpunkt (Linje V). Notera att fältet från 3-fas förbanden avtar snabbare än från 1-fas kabeln. I Figur 5 och Figur 6 visas motsvarande horisontella linjer.

Det magnetiska fältet från ett horisontellt kabelförband kan för längre avstånd uppskattas med uttrycket [3].

$$B = \frac{\mu_0 \times \sqrt{3} \times S \times I}{2\pi \times R^2} \quad [3]$$

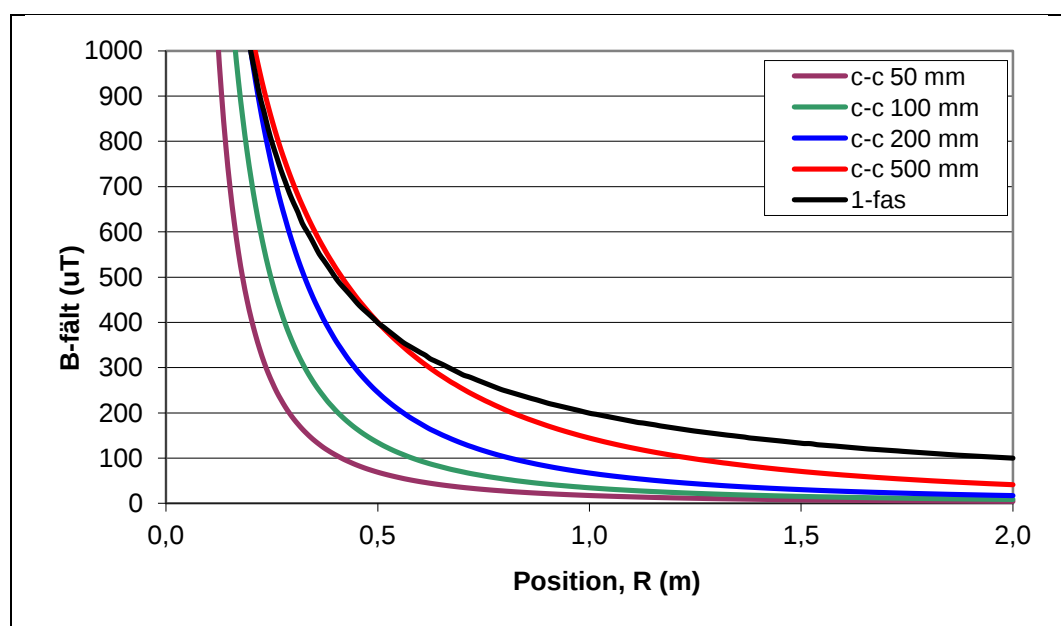
Där B = flödestätheten i T, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$, S = fasavståndet i m,
 I = strömmen i A, R = avståndet mellan kabel och beräkningspunkt i m.

Detta kan för fält i luft förenklas till:

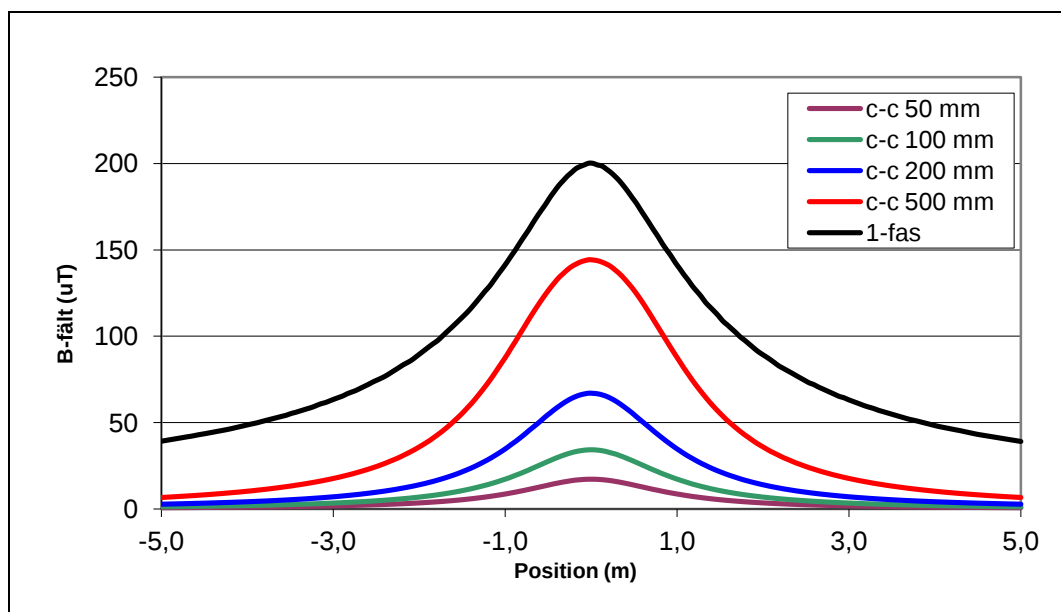
$$B = \frac{0,2 \times \sqrt{3} \times S \times I}{R^2} \quad [4]$$

med I i A och S och R i m fås B i μT .

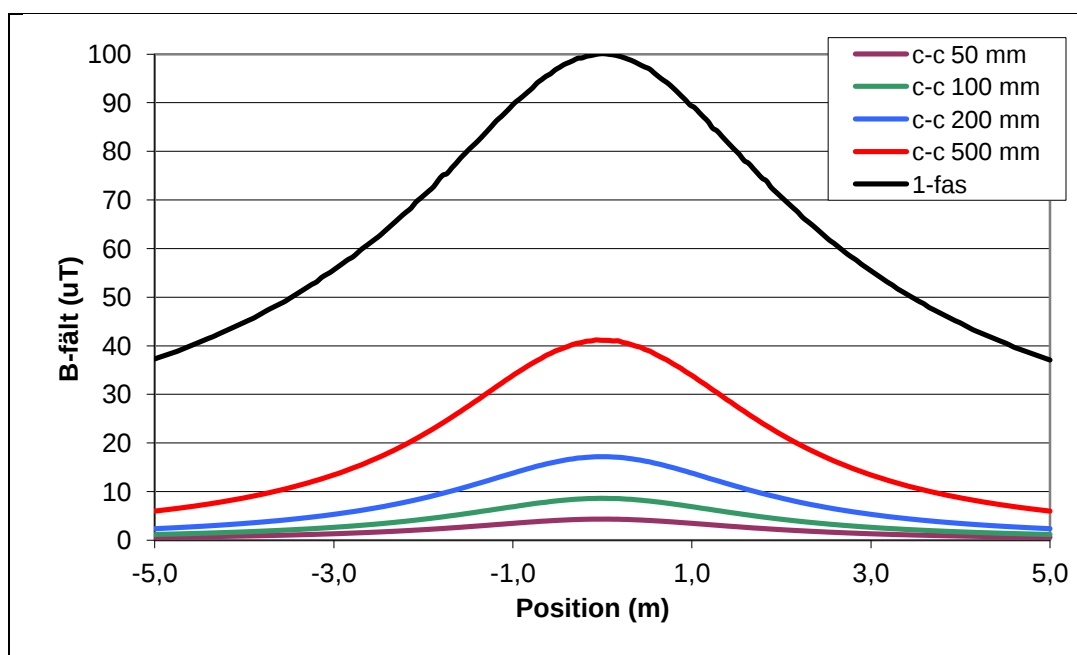
För $R > 5 S$ blir felet $< 5 \%$ och för $R > 7 S$ blir felet $< 2 \%$.



Figur 4. B-fält längs en vertikal linje från 3-fas kabelförband. Linje V.
 $I = 1\,000$ A. Kurvan för 1-fas kabeln som referens.



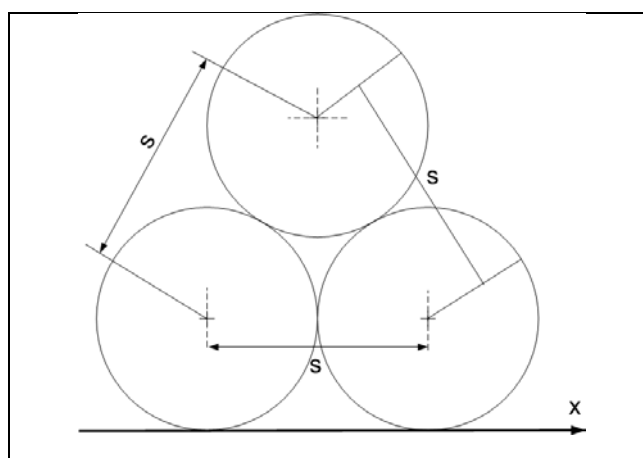
Figur 5. B-fältet längs horisontella linjer 1,0 m ovan kabelförband. Linje H 1,0.
 $I = 1000$ A.



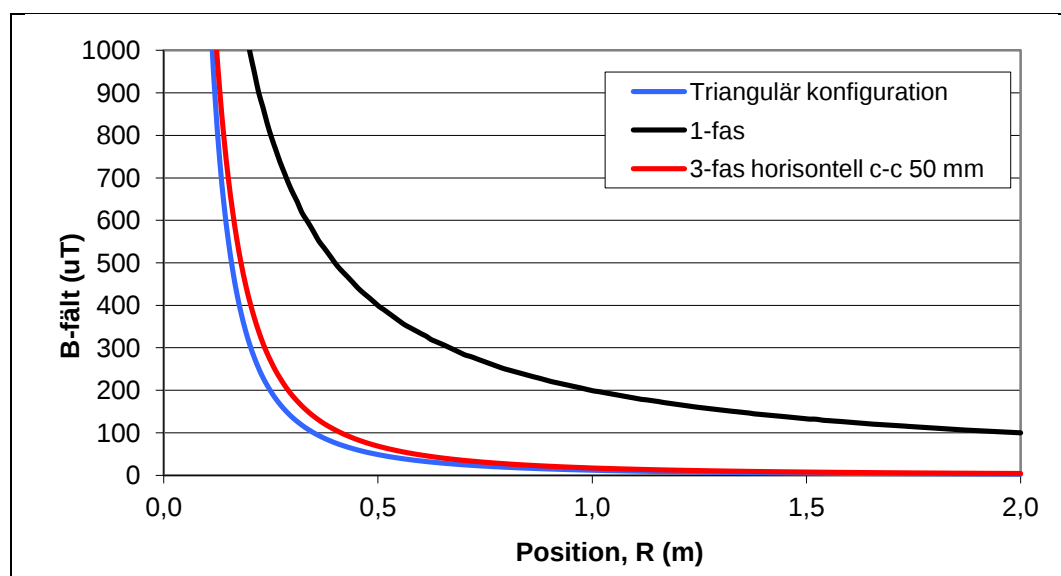
Figur 6. B-fältet längs horisontella linjer 2,0 m ovan kabelförband. Linje H 2,0.
 $I = 1000$ A.

4.1.3 3 st 1-fas kablar i triangulär konfiguration

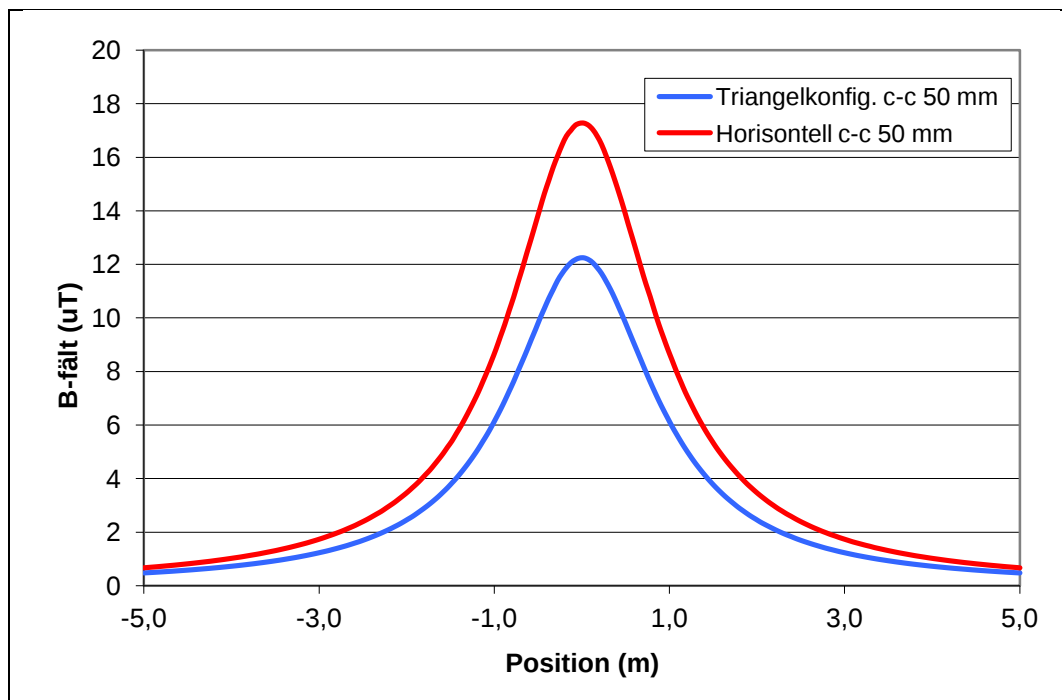
Om magnetfältet måste begränsas mer än vad en kompakt horisontell förläggning medger finns möjligheten att lägga kablarna i en triangulär konfiguration. På detta sätt minskas det inbördes fasavståndet ytterligare och fältet kan begränsas än mer. Figur 7 visar en triangulär konfiguration med fasavståndet S , i detta fall är $S = 50$ mm (lika med kabeldiametern). Flödestätheten längs Linje V visas i Figur 8 tillsammans med motsvarande för en 1-fas kabel och ett horisontellt förband med c-c 50 mm. Det framgår tydligt att den triangulära konfigurationen ger det lägsta fältet. I Figur 9 visas flödestätheten längs linje H 1,0.



Figur 7. Triangulär konfiguration.



Figur 8. B-fält längs en vertikal linje från 3-fas kabelförband, triangulär och horisontell konfig. Linje V. $I = 1\,000$ A. Kurvan för 1-fas kabel som referens.



Figur 9. B-fältet från en triangulär konfiguration jmf med en horisontell med samma fasavstånd. Linje H 1,0. I = 1 000 A.

Det magnetiska fältet från en triangulär konfiguration kan för längre avstånd uppskattas med uttrycket [5].

$$B = \frac{\mu_0 \times \sqrt{6} \times S \times I}{4\pi \times R^2} \quad [5]$$

Där B = flödestätheten i T, $\mu_0 = 4 \pi 10^{-7}$, S = fasavståndet i m,
 I = strömmen i A, R = avståndet mellan kabel och beräkningspunkt i m.

Detta kan förenklas till

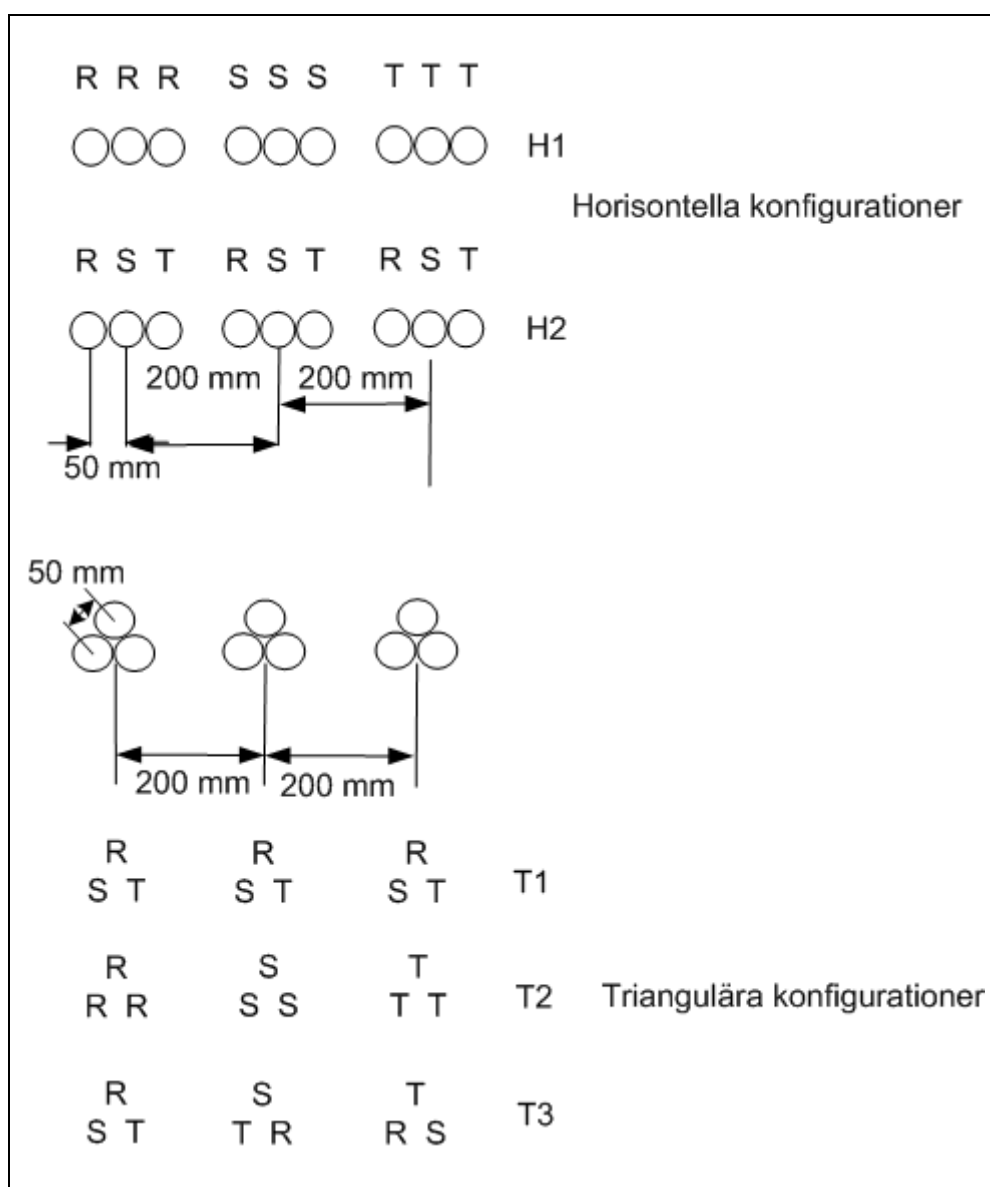
$$B = \frac{0,1 \times \sqrt{6} \times S \times I}{R^2} \quad [6]$$

med I i A och S och R i m fås B i μT . För $R > 3 S$ blir felet $< 5 \%$ och för $R > 4 S$ blir felet $< 2 \%$.

4.1.4 3 x 3 st 1-fas kablar i horisontell och triangulär konfiguration

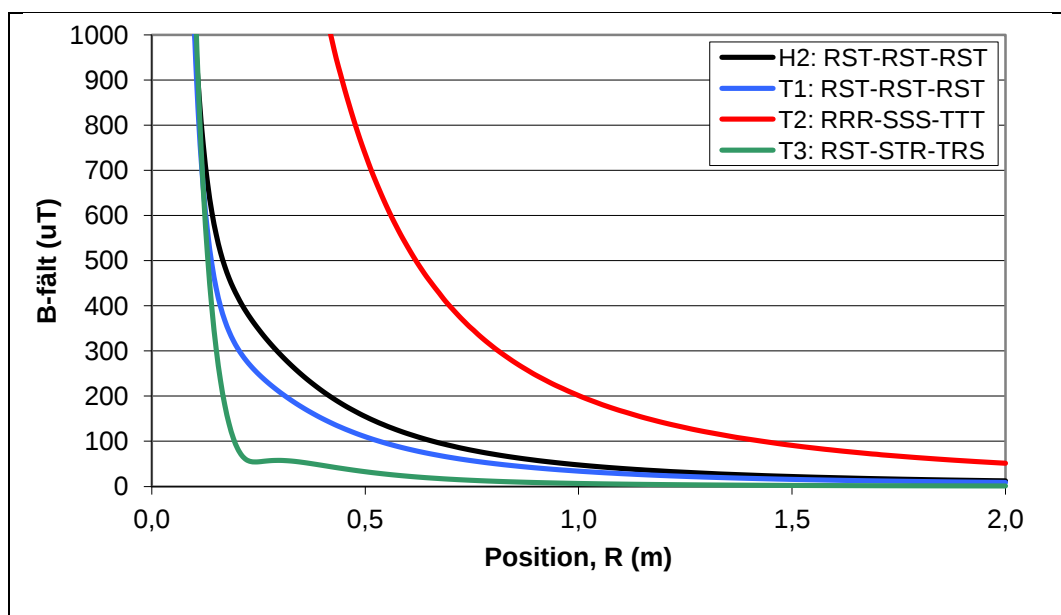
I de fall belastningen kräver parallella kablar (eller skenor) finns flera möjliga konfigurationer – horisontella och triangulära – att välja på. Valet kommer dock att ha en betydande inverkan på magnetfältsnivån. I detta fall ingår tre parallella grupper med tre faser. Var fas är belastad med 1 000 A, 50 Hz.

I de studerade fallen är avståndet mellan faser inom en grupp 50 mm och avståndet mellan grupper är 200 mm. Figur 10 visar de olika beräkningsfallen.

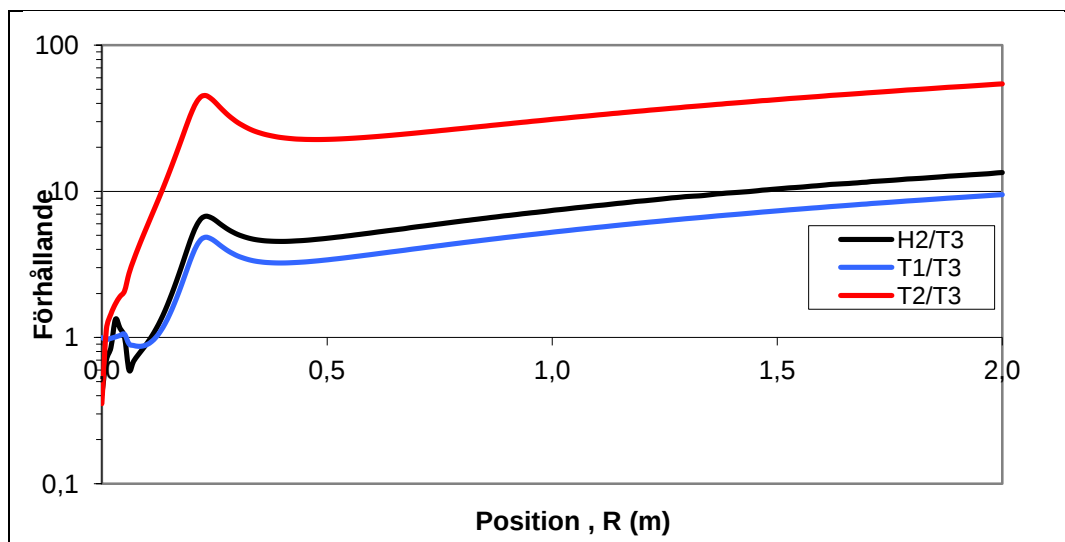


Figur 10. Fyra olika kabelförband med 3 x 3 ledare.

Figur 11 visar det magnetiska fältet längs Linje V. Det framgår tydligt att valet av konfiguration har stor betydelse för flödestäthetens nivå. Figur 12 visar denna skillnad tydligare. Skillnaden mellan "bästa" triangulära konfigurationen, T3 med faserna roterade, kan uppgå till mer än 50 gånger jämfört med T2, där alla ledare i en fas lagts tillsammans. H1 - den horisontella motsvarigheten till T2 - ger en fältbild snarlik T2.

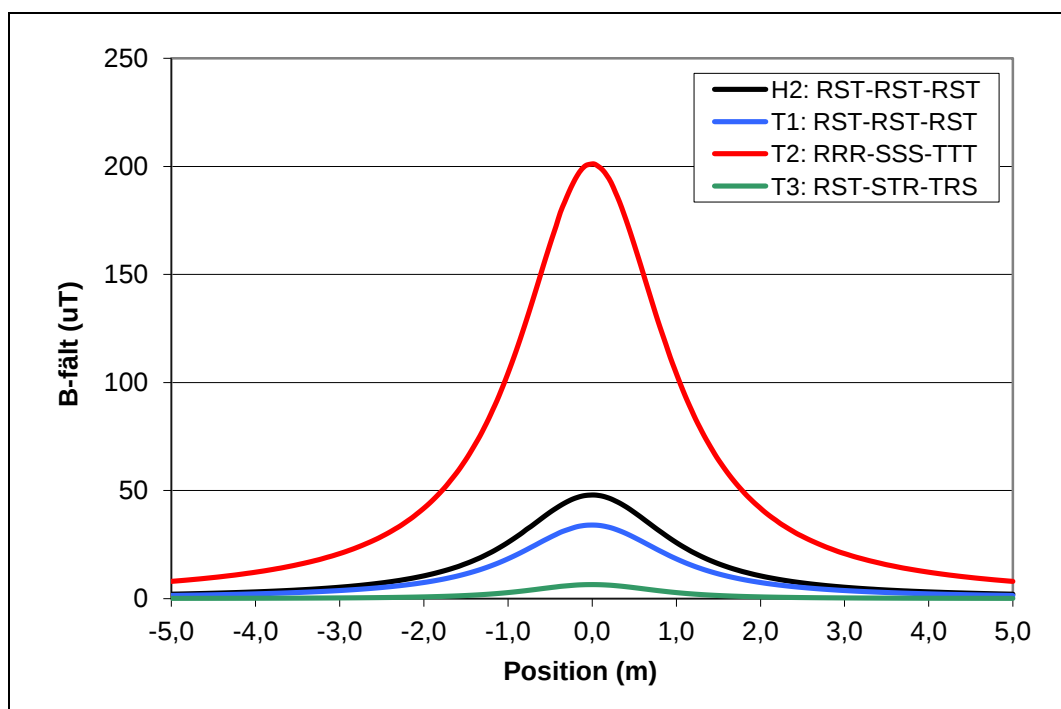


Figur 11. B-fältet från 4 olika varianter av 3 x 3 faser. $I = 1000$ A. Linje V.

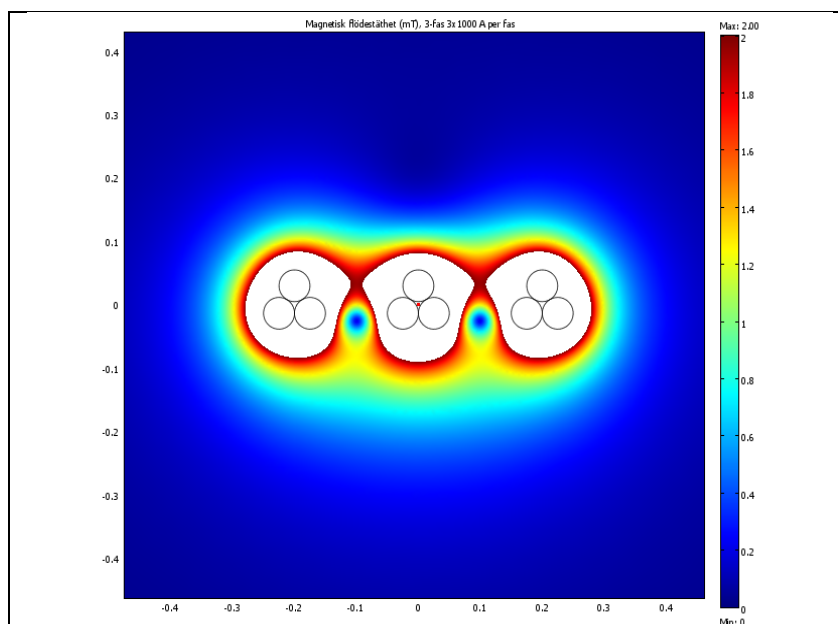


Figur 12. B-fältet från tre olika kabelförband jämfört med den bästa triangulära konfigurationen, T3, med roterade faslägen. $I = 1000$ A. Linje V. Den tydliga "puckeln" orsakas av knäpunkten för T3 i Figur 11.

Figur 13 visar flödestätheten längs Linje H 1,0 för de fyra fallen och i Figur 14 visas en konturplot för roterade triangulära konfigurationen.



Figur 13. B-fältet för 4 olika varianter av 3 x 3 faser. $I = 1000$ A. Linje H1,0.



Figur 14. Konturplot för den roterade triangulära konfigurationen T3. $I = 1000$ A. Skalans maxvärde (gränsen till vitt) är 2 mT.

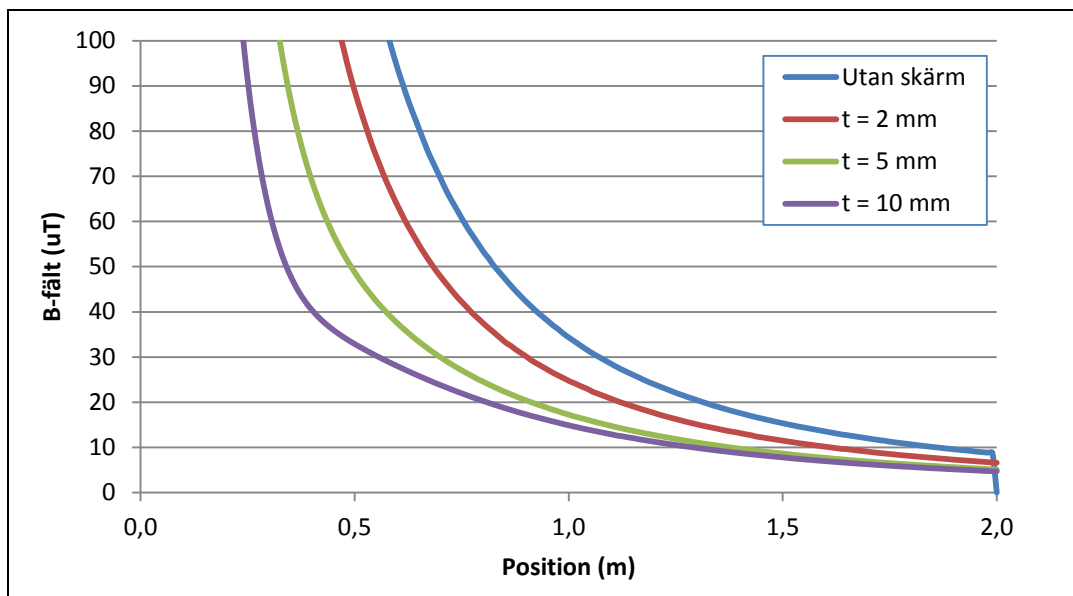
4.2 Magnetfält från kabelförband med skärm

Skärmning med ledande eller ferromagnetiska material är en annan möjlighet att begränsa det magnetiska fältet. I det följande ges några exempel på vad som kan åstadkommas med olika lösningar. Exempelen är beräknade 2-dimensionellt med Comsol Multiphysics, vilket innebär att både kablar och skärmar är oändligt långa. För en skärm med en begränsad längd måste man ta hänsyn till randeffekter från skärmens ändpunkter.

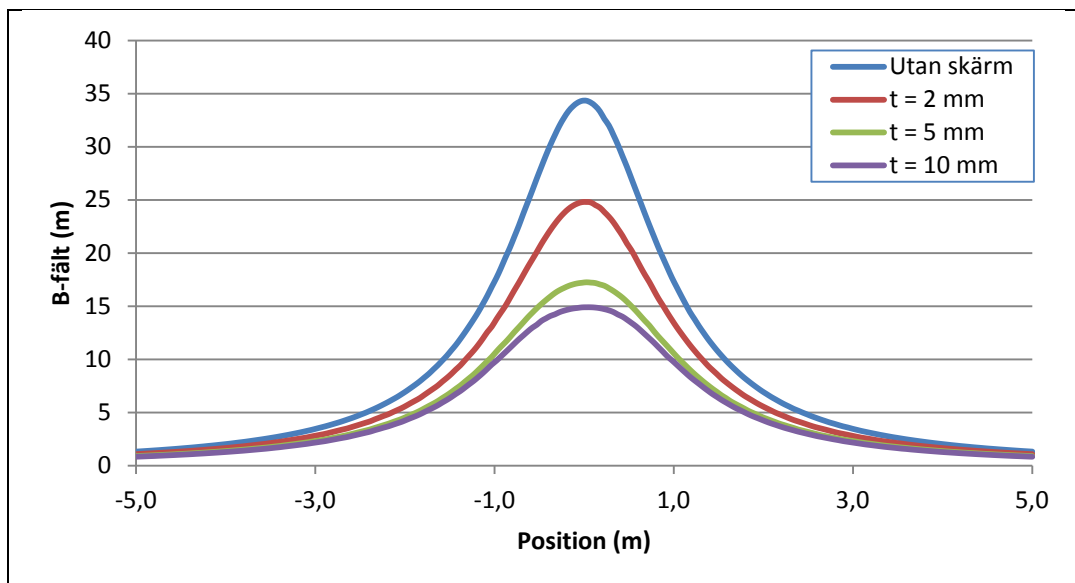
Skärmens effektivitet är beroende av en rad faktorer, som bl a dess tjocklek, ledningsförmåga, bredd, form och avståndet ledare - skärm. Vid användning av ferromagnetiska material måste man beakta risken för mättning vid höga fältstyrkor (till skillnad från vid användning av aluminium) och likaså risken för korrosion.

4.2.1 Skärmens tjocklek

Skärmens förmåga att begränsa det magnetiska fältet ökar med dess tjocklek som visas i följande exempel. Källan för fältet är en 3-fas horisontell ledarkonfiguration med c-c 100 mm mellan ledarna och $I = 1000$ A. Avståndet mellan ledare och den horisontella skärmen, d , är 200 mm och skärmens bredd, B , är 0,6 m. Skärmen antas vara av aluminium med en konduktivitet, σ , av $2,326 \times 10^7$ S/m. Dess relativa permeabilitet, μ_r , är 1. Se Figur 15 och Figur 16. Det kan tilläggas att den valda konduktiviteten är låg för att avse aluminium. Aluminiumplåt enligt SS 4007 (99,5 % Al) har en resistivitet av $0,027 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$ eller $2,7 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$. Detta motsvarar $3,7 \times 10^7$ S/m, dvs ett värde 60 % högre än det använda vid dessa beräkningar. Detta konservativa antagande ger marginal för bl a kontaktresistansen i fogar mellan plåtar.



Figur 15. Beräknat B-fält med och utan skärm. Ledarkonfigurationen är en 3-fas horisontell konfiguration med c-c 100 mm mellan ledare och 200 mm mellan ledare och den horisontella och plana skärmen. $I = 1000$ A. Skärmen är 0,6 m bred och dess tjocklek 2 – 10 mm. Linje V.



Figur 16. Samma konfiguration som i Figur 15. Linje H 1,0.

Vinsten med skärm är mest betydande när fältet är som högst. Vid avstånd >2 m är betydelsen ringa. I praktiken används ofta aluminiumplåt med en tjocklek på 5-6 mm. Tjockare plåt ger som figuren visar endast en mindre ökning av skärmeffekten, samtidigt som kostnaden för plåten i det närmaste fördubblas.

4.2.2 Skärmens ledningsförmåga

I föregående exempel antogs ledningsförmågan, σ , vara $2,326 \times 10^7$ S/m. Detta värde ligger i den nedre delen av spannet för aluminiumplåt och värden över $3,5 \times 10^7$ S/m förekommer. Skärmverkan ökar med ökande ledningsförmåga och detta visas här med tre beräkningsfall med $\sigma = 1,0 \times 10^7$ S/m, $2,326 \times 10^7$ S/m och $5,82 \times 10^7$ S/m. Det lägre värdet motsvarar ungefär konduktiviteten för tenn och den högre motsvarar kopparplåt. Den relativa permeabiliteten, μ_r , har antagits vara 1. Se Figur 17 och Figur 18.

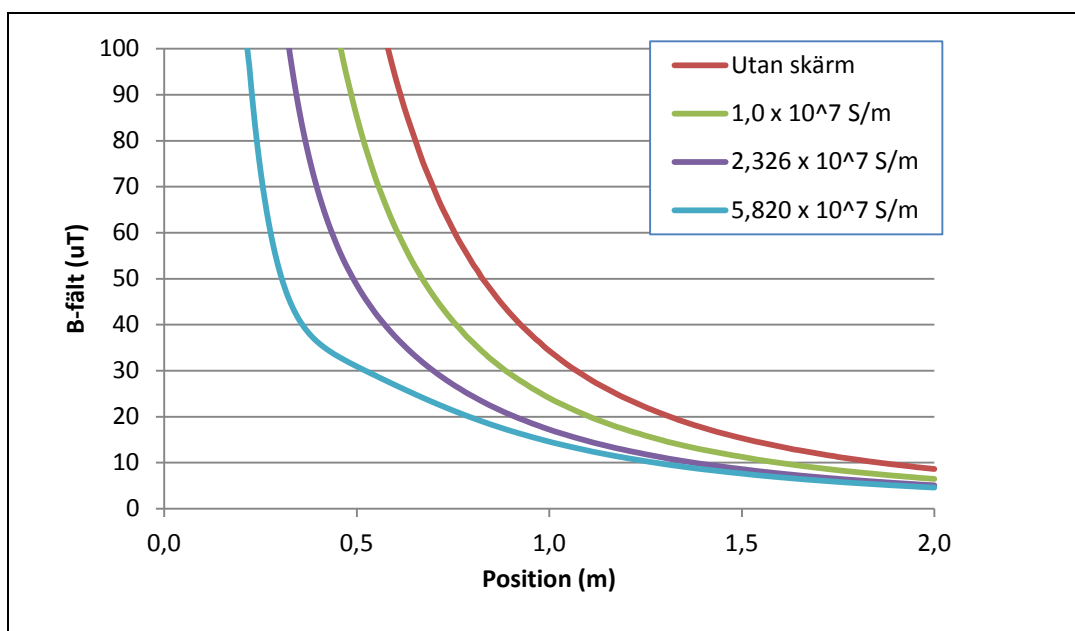
Det framgår tydligt att skärmen skall ha en viss minsta ledningsförmåga för att göra någon påtaglig nytta, men att skillnaden mellan aluminium ($\sigma=2,326 \times 10^7$ S/m) och koppar $5,82 \times 10^7$ S/m) är högst måttlig och i flertalet fall är det inte ekonomiskt försvarbart att skärma med kopparplåt.

4.2.3 Plan och horisontell skärm

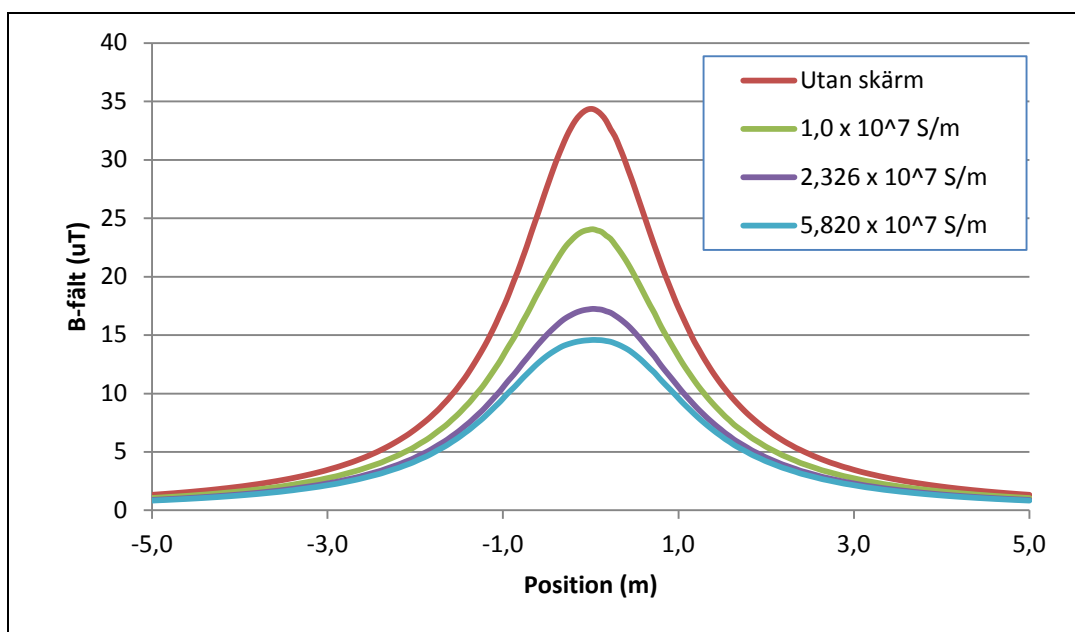
De följande exemplen med en plan och horisontell skärm är likaså beräknade med en 3-fas horisontell ledarkonfiguration med c-c 100 mm och $I = 1000$ A, 1 ledare per fas. Skärmen är där ej annat anges 5 mm tjock och av aluminium med $\sigma = 2,236 \times 10^7$ S/m.

Figur 19 och Figur 20 visar inverkan av avståndet mellan ledare och skärm (d). Skärmens bredd är 10 m, vilket får anses vara en i sammanhanget

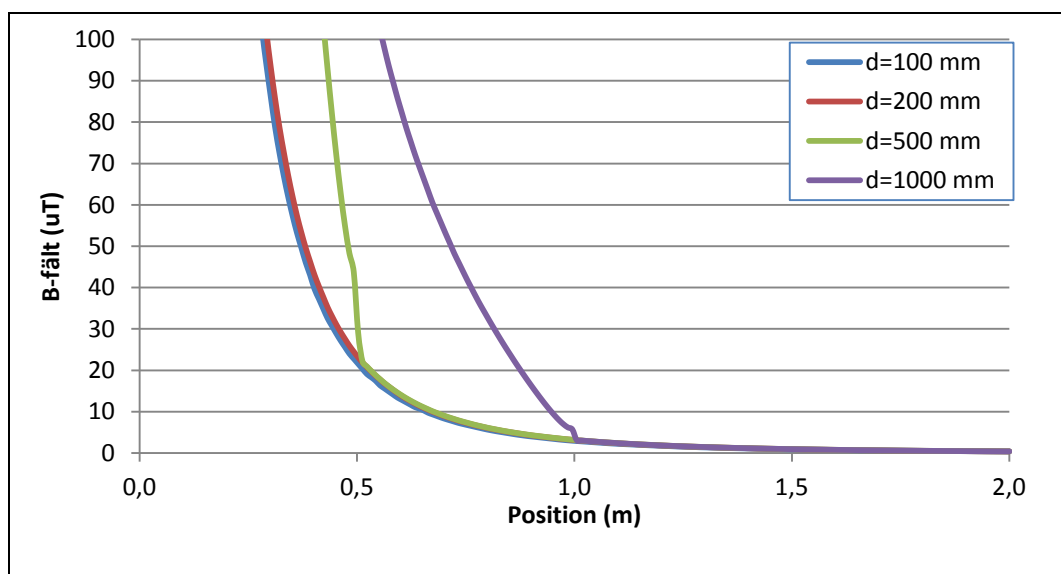
oändligt bred skärm. Figurerna visar att bäst skärmverkan fås med skärmen placerad nära ledarna.



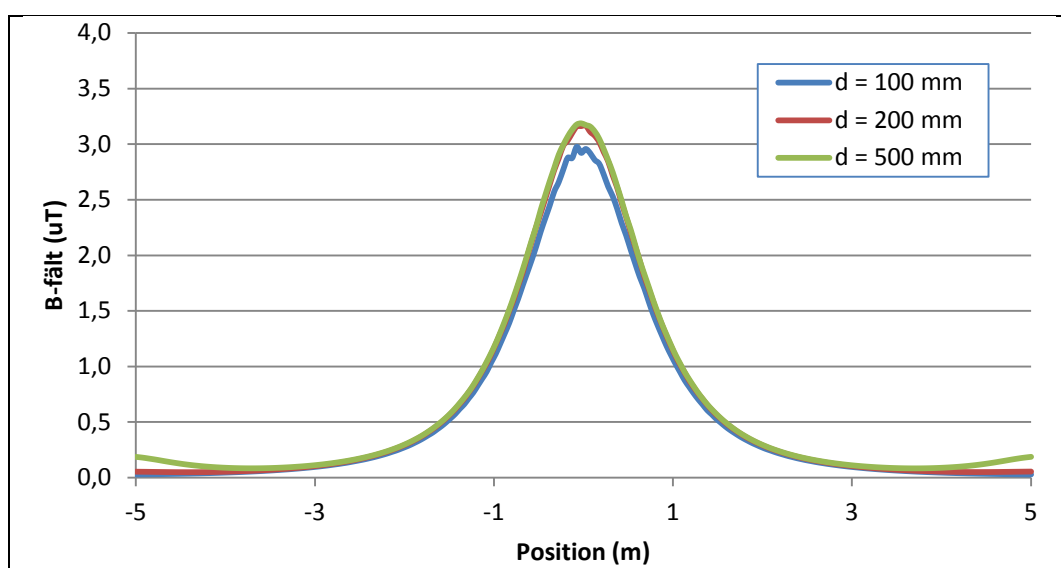
Figur 17. Beräknat B-fält med och utan skärm. Samma konfiguration som i Figur 15. Skärmens konduktivitet är 1,0; 2,236 och 5,82 x 10⁷ S/m. Linje V. Notera att 10⁷ skrivs 10^{^7} i figurens förklaring.



Figur 18. Beräknat B-fält med och utan skärm. Samma konfiguration som i Figur 15. Skärmens konduktivitet är 1,0; 2,236 och 5,82 x 10⁷ S/m. Linje H1. Notera att 10⁷ skrivs 10^{^7} i figurens förklaring.



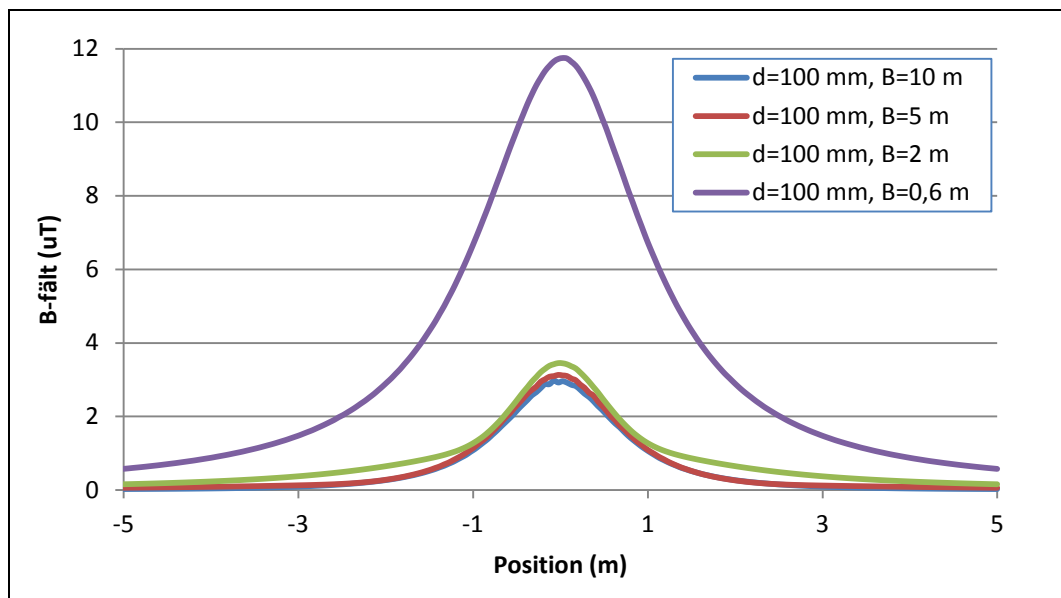
Figur 19. Inverkan av avståndet mellan ledare och skärm. 3-fas horisontell konfiguration. $I = 1000$ A. Linje V. De markanta knäpunkterna sammanfaller med läget för skärmen.



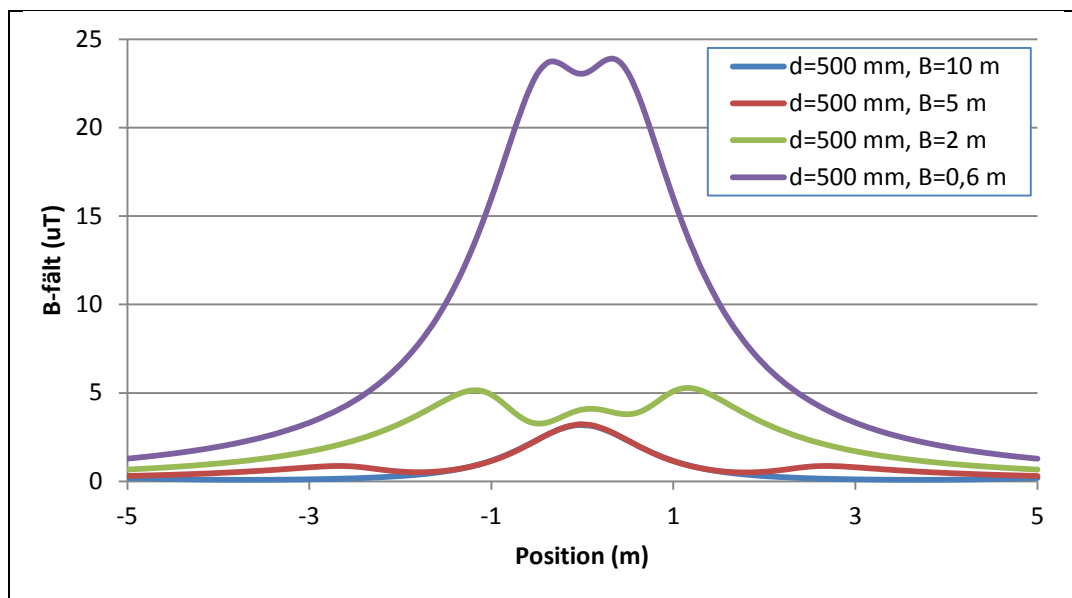
Figur 20. Inverkan av avståndet mellan ledare och skärm. 3-fas horisontell konfiguration. $I = 1000$ A. Linje H 1,0.

Skärmens bredd har stor betydelse skärmverkan. Med en så smal skärm som $B = 0,6$ m kommer fältet att "läcka" upp över skärmens kanter. Detta visas i Figur 21 med $d = 100$ mm och i Figur 22 med $d = 500$ mm. Med längre avstånd mellan ledare och skärm krävs en bredare skärm för bibehållen skärmverkan. Figur 23 visar hur fältet "läcker" upp och förbi skärmens kanter.

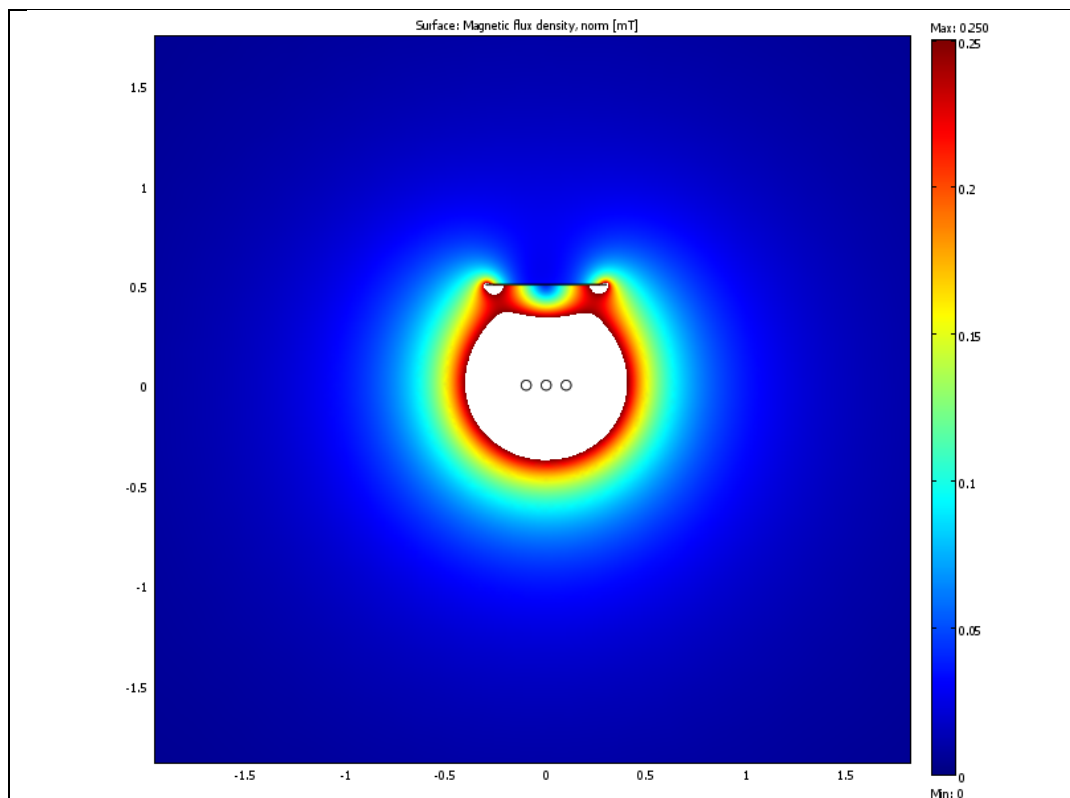
Avståndet mellan ledare och skärm (d) är 0,5 m och skärmens bredd (B) är 0,6 m.



Figur 21. Inverkan av skärmens bredd. 3-fas horisontell konfiguration.
d = 100 mm. I = 1000 A. Linje H 1,0.



Figur 22. Inverkan av skärmens bredd. 3-fas horisontell konfiguration.
d = 500 mm. I = 1000 A. Linje H 1,0.



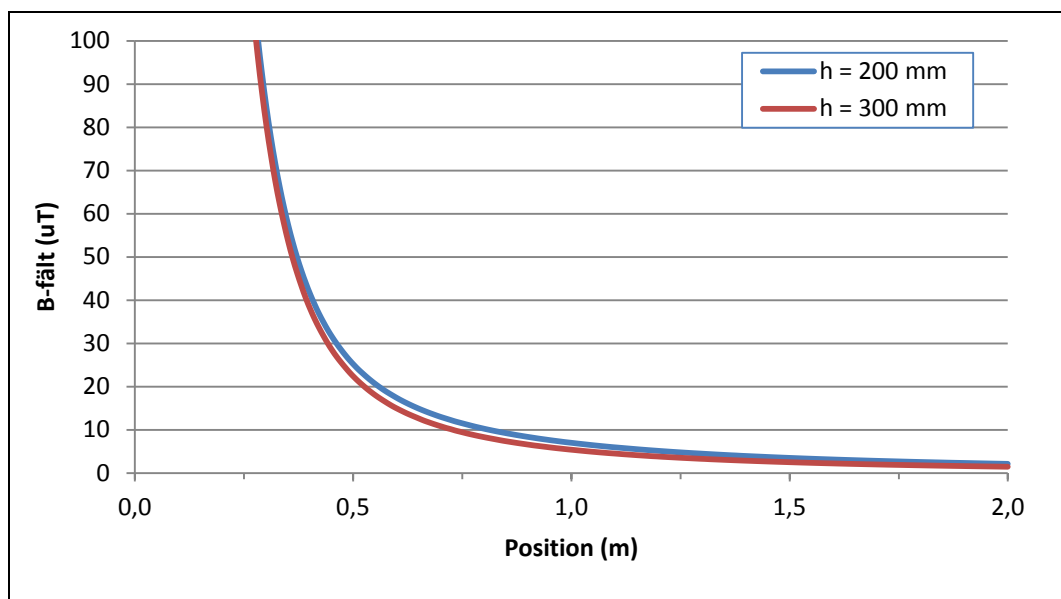
Figur 23. Konturplot. 3-fas horisontell konfiguration. $d = 500$ mm. $B = 0,6$ m. $I = 1000$ A. Skalans maxvärde är 0,25 mT.

4.2.4 Bockad skärm med öppningen mot ledarna

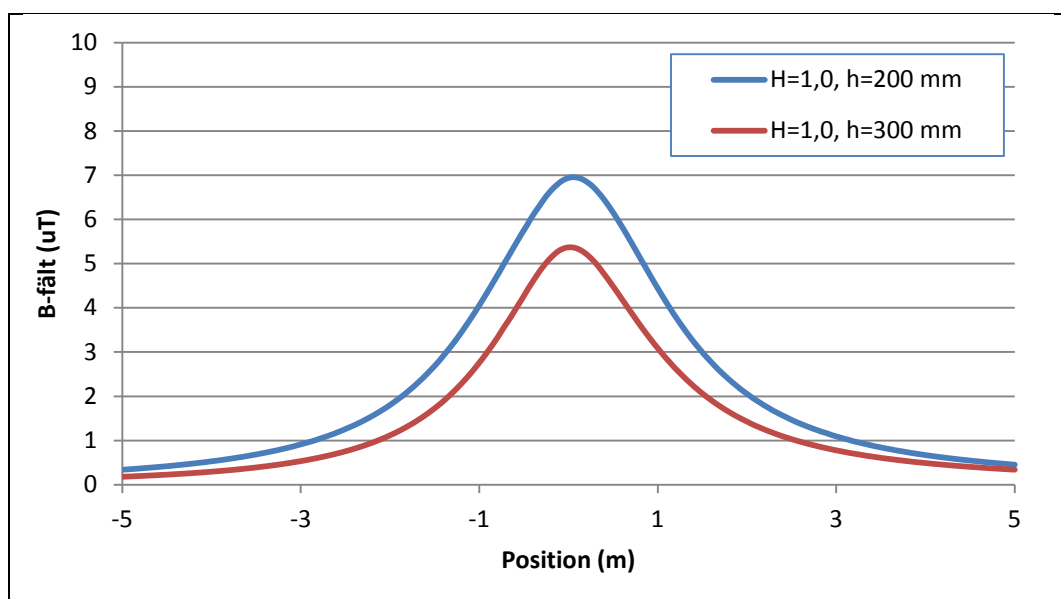
Med en bockad skärm finns mindre risk att fältet "läcker" upp över kanten. I detta exempel är skärmen formad som ett upp och ner vänt U. Den horisontella delen är 600 mm bred och längden h av de vertikala skänklarna är i de två beräkningsfallen 200 mm respektive 300 mm. Källan för fältet är samma 3-fas arrangemang som i tidigare exempel, d v s 1 ledare per fas och c-c 100 mm mellan ledare. $I = 1000$ A. Avståndet d mellan ledare och det horisontella skärmsegmentet är 200 mm. De 200 mm långa skänklarna slutar i nivå med kablarna och de 300 mm långa slutar 100 mm under kablarna.

Figur 24 visar att fältet avtar med avståndet i stort sett i samma takt med $h = 200$ mm som med $h = 300$ mm. Även med de kortare skänklarna så ligger deras nedre kant i nivå med ledarnas centrumlinje och begränsar läckfältet under kanten.

Figur 25 visar motsvarande längs den horisontella linjen $H = 1,0$ m och med en expanderad skala. Skillnaden framträder här något mer, men uppgår inte till mer än knappt $2 \mu\text{T}$.



Figur 24. Inverkan av skänklarnas längd. 3-fas horisontell konfiguration. $d = 200$ mm. $I = 1000$ A. Linje V.

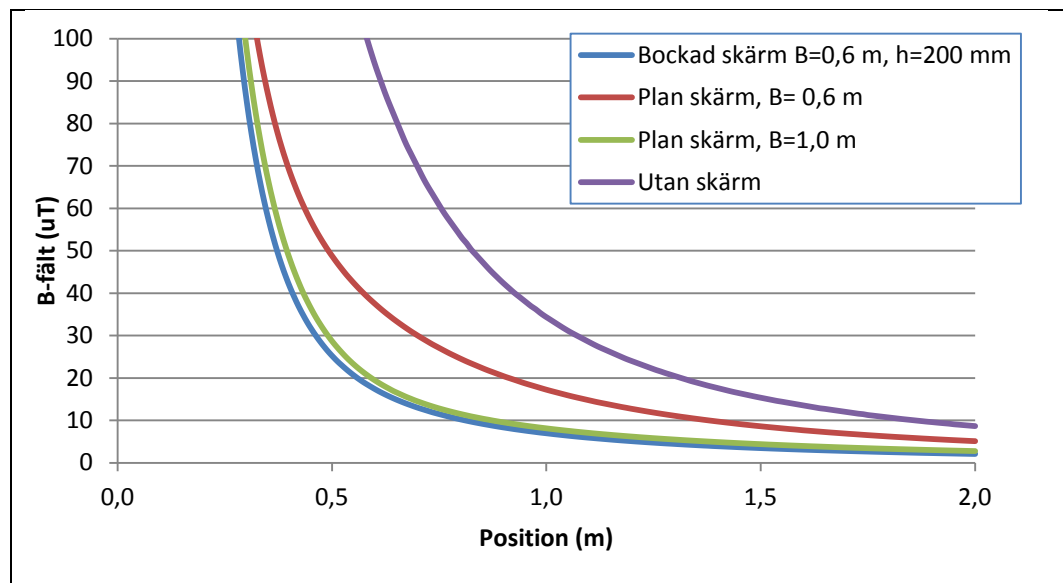


Figur 25. Inverkan av skänklarnas längd. 3-fas horisontell konfiguration. $d = 200$ mm. $I = 1000$ A. Linje H 1,0.

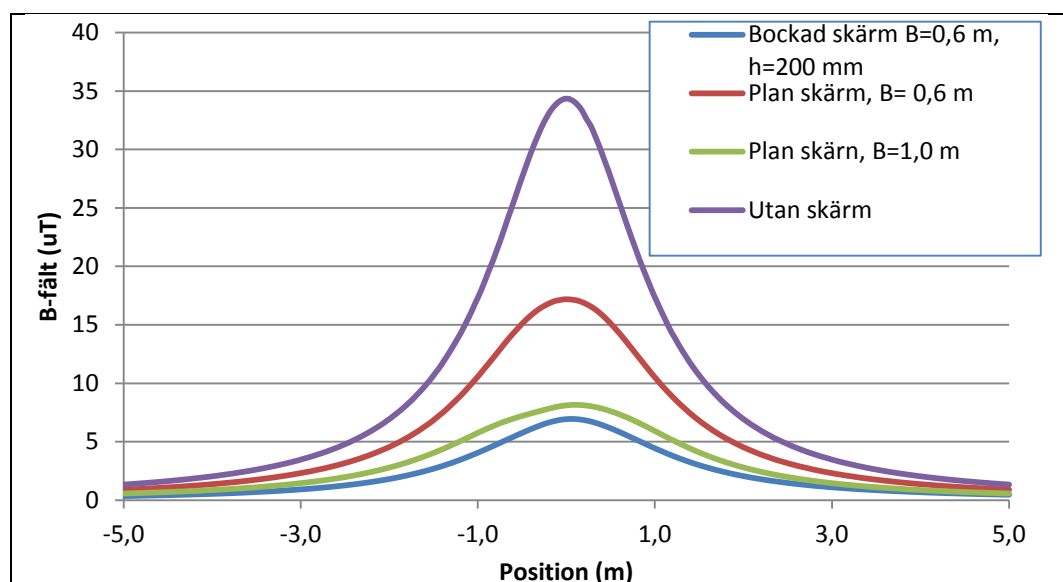
Figur 26 och Figur 27 visar inverkan av en böckad skärm jämfört med en plan och jämfört med ett fall utan skärm. För plan skärm redovisas två alternativ, med bredd 0,6 m och 1,0 m. Den bredare plana skärmen kräver lika mycket material som den böckade skärmen (0,2+0,6+0,2 m).

Den relativa skillnaden mellan de olika alternativen varierar något med avstånd och fältets nivå. Bäst skärmverkan fås i närområdet, när fältet är

högst. För den plana 0,6 m breda skärmen ökar fältet från ca 50 % relativt det oskärmade fallet rakt ovanför kablarna till ca 70 % vid +/- 5 m. För den 1,0 m breda skärmen är motsvarande siffror ca 23 respektive 43 % och för den bockade skärmen ca 20 respektive 25 %.



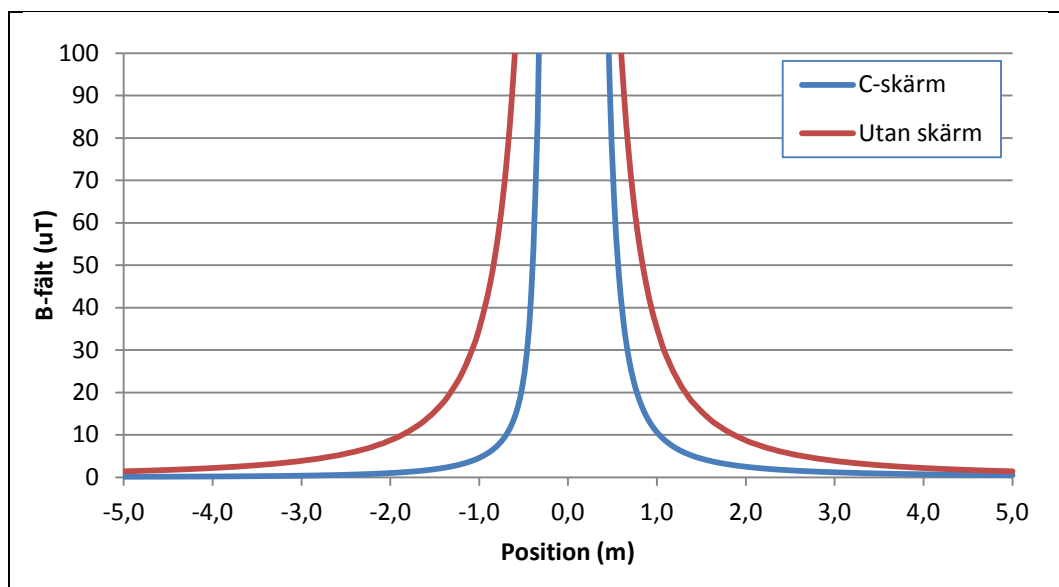
Figur 26. Jämförelse med och utan skärm av olika typ. 3-fas horisontell konfiguration. $d = 200$ mm. $I = 1000$ A. Linje V.



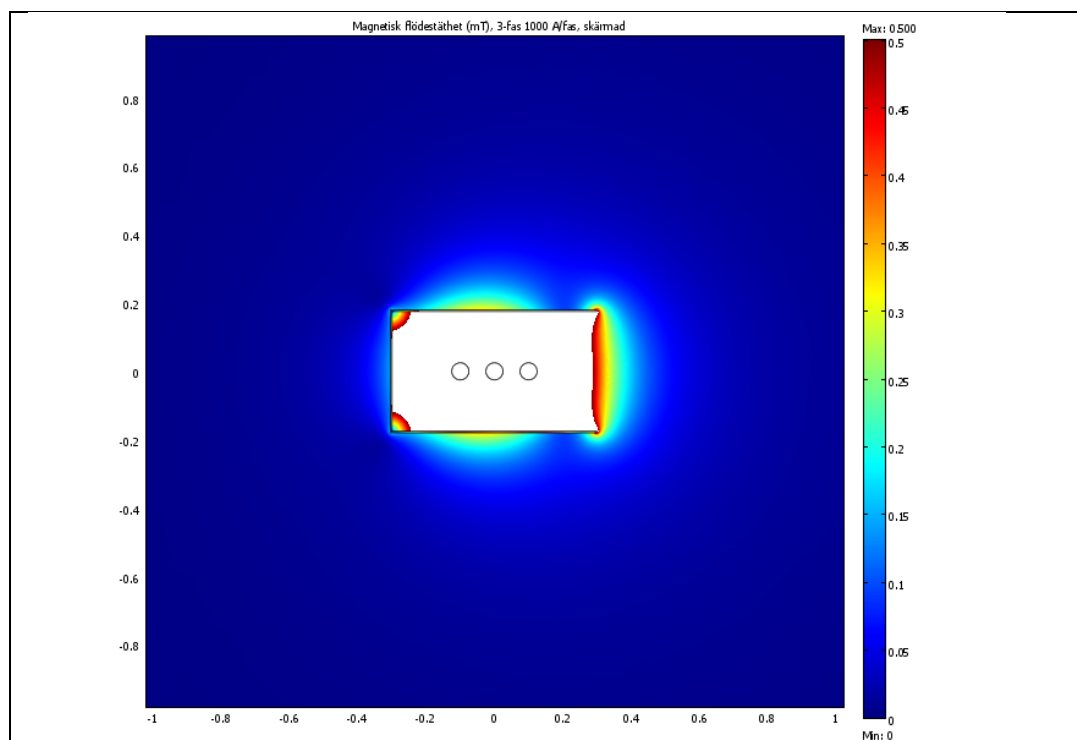
Figur 27. Jämförelse med och utan skärm av olika typ. 3-fas horisontell konfiguration. $d = 200$ mm. $I = 1000$ A. Linje H 1,0.

4.2.5 C-bockad skärm

Den C-bockade skärmen är ett specialfall tänkt att skärma kabel- och skenförband i de fall då personer kan befinna sig på samma nivå som förbandet. En tillämpning kan vara förband lagda på stege i kulvert eller kabelkällare. Figur 28 visar en skärmning med C-bokad skärm med öppningen mot höger i figuren (i positiv riktning). Källan för fältet är samma 3-fas arrangemang som i föregående exempel, d v s 1 ledare per fas, c-c 100 mm mellan ledare och $I = 1000$ A. Avståndet mellan de horisontella plåtarna över och under kabeln är 400 mm, d v s 200 mm mellan kabelcentrum och plåt. Avståndet från den vertikala skärmplåten och närmaste kabelcentrum är 150 mm. Längden av de horisontella plåtarna eller skänklarna är 600 mm. Kurvan för det skärmade fältet visar på en viss asymmetri, men högst måttlig med tanke på att skärmen är öppen mot höger. Något utanför skärmen, vid -0,35 m, har fältet sjunkit till ca 25 % av det opåverkade. På större avstånd, > 1 m, har fältet minskat till 12-13 % av det opåverkade. Figur 29 visar motsvarande i form av en konturplot.



Figur 28. B-fältet längs en horisontell linje genom kabelförbandet. Skärmning med C-formad skärm. Öppningen mot höger i figuren. 3-fas horisontell konfiguration. c-c- 100 mm. $I = 1000$ A.

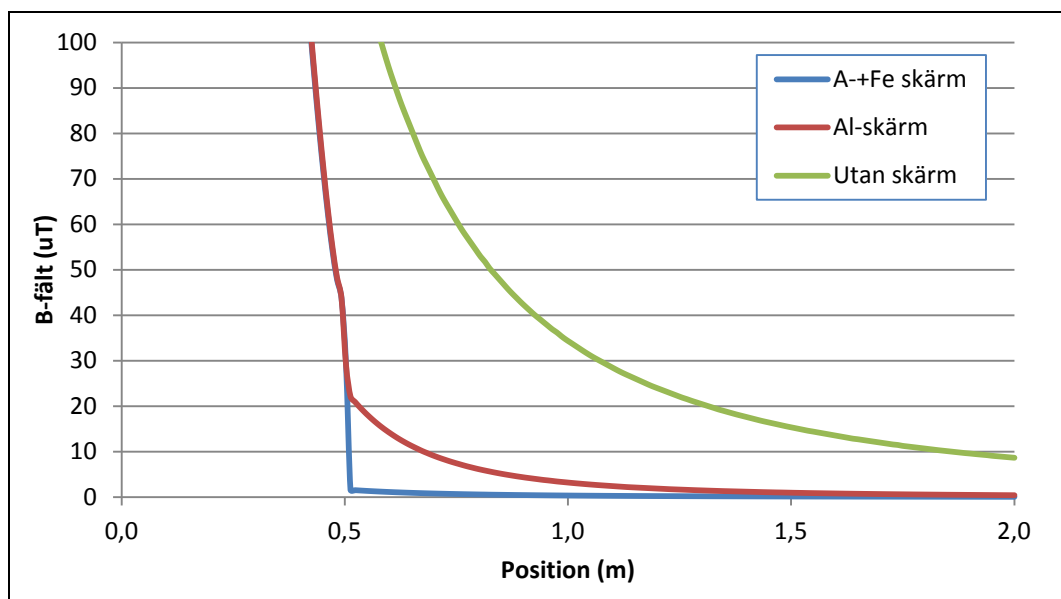


Figur 29. Konturplåt över den C-formade skärmen. Skalans maxvärde är 500 μ T. 3-fas horisontell konfiguration. $d = 200$ mm. $I = 1000$ A.

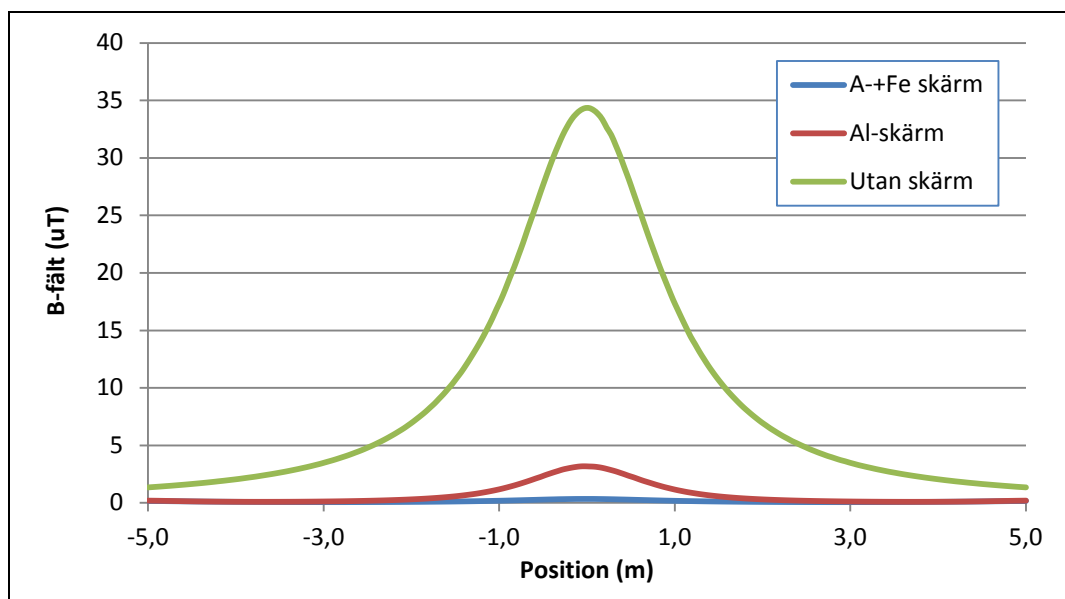
4.2.6 Dubbelskärm med aluminium- och järnplåt

Skärmning med en kombination av aluminium- och järnplåt ger god skärmverkan och en sådan kombination blir också mindre kritisk för hål och spalter i aluminiumplåten. I detta fall består skärmen av en 5 mm tjock Al-plåt ($\sigma = 2,326 \times 10^7$ S/m och $\mu_r = 1$) närmast ledarna och ovanpå denna en 2 mm tjock järnplåt ($\sigma = 0,5 \times 10^7$ S/m och $\mu_r = 1000$). Skärmverkan är beräknad med 10 och 0,6 m breda plåtar, de förra är i praktiken oändligt breda. Ledarkonfigurationen är densamma som i tidigare exempel, d v s en 3-fas horisontell konfiguration med 1 ledare per fas, c - c 100 mm mellan kabelcentrum och $I = 1000$ A.

Figur 30 och Figur 31 visar magnetfältet med en Al + Fe-skärm 0,5 m ovanför centrum av kabelförbandet. För jämförelse visas även fältet med enbart Al-skärm och helt utan skärm. Skärmverkan utanför skärmen blir betydligt bättre med dubbel skärm.

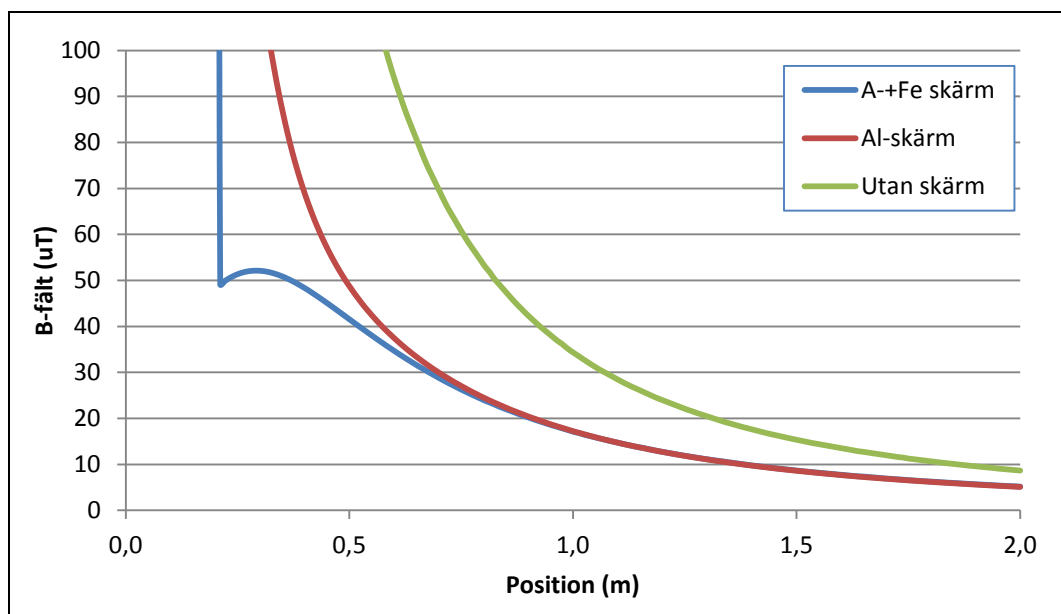


Figur 30. Skärmning med kombinerad Al och Fe-skärm. Skärmlåtarnas bredd, B = 10 m. Avstånd mellan ledare och skärm, d = 500 mm. 3-fas horisontell konfiguration. c-c 100 mm. I = 1000 A. Linje V.

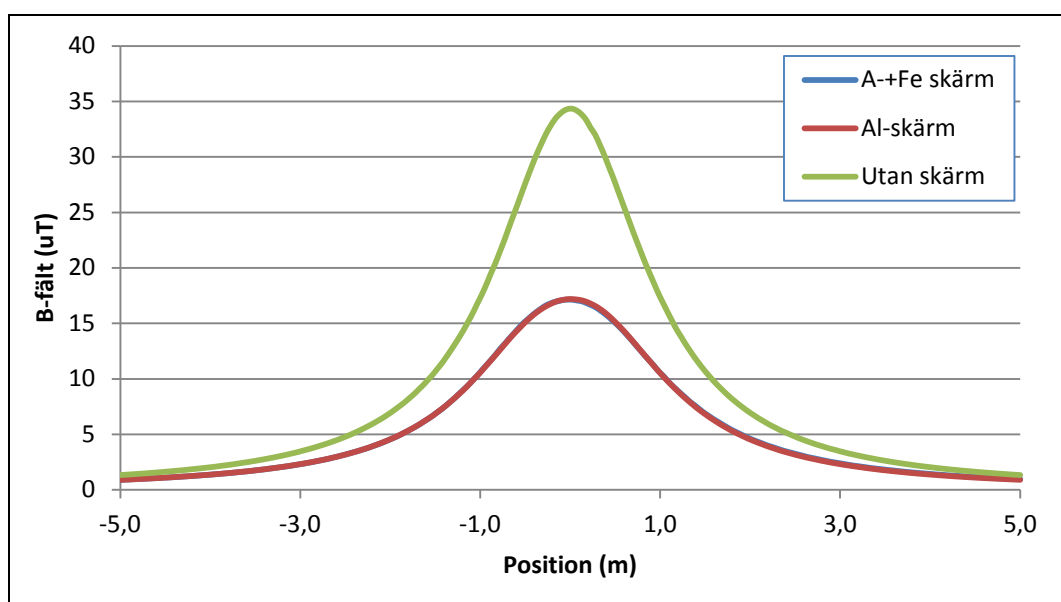


Figur 31. Samma skärm och ledarkonfiguration som i Figur 30. Linje H 1,0.

Figur 32 och Figur 33 visar det beräknade fältet för ett motsvarande fall men med 0,6 m breda skärmar och med skärmen 200 mm från ledarna. Vinsten med dubbel skärm är mer måttlig jämfört med de bredare skärmarna och framförallt är vinsten liten då flödestätheten är låg.



Figur 32. Skärmning med kombinerad Al och Fe-skärm. Skärmsplåtarnas bredd, $B = 0,6$ m, avstånd mellan ledare och skärm, $d = 200$ mm. 3-fas horisontell konfiguration. c-c 100 mm. $I = 1000$ A. Linje V.



Figur 33. Samma skärm och ledarkonfiguration som i Figur 32. Linje H 1,0. Kurvorna för Al och Al + Fe är i stort sett identiska.

4.3 Introduktion till analytisk beräkning av skärmning

De många exemplen i föregående avsnitt visar på de goda möjligheter som finns att räkna på skärmning med numeriska metoder. Det är lätt att ändra geometrier och skärmarna kan bockas på lämpligt sätt. Det är också, som alltid, lätt att göra fel och med avancerad programvara typ Comsol Multiphysics är det inte alltid självklart vad som är rätt eller fel. Enkla analytiska beräkningsmetoder ger däremot en möjlighet att avgöra vad som är rimligt eller ej.

I det följande visas på ett förfarande för att beräkna effekten av en plan skärm på ett magnetiskt fält. Metodik och formler har till stora delar hämtats ur "Noise reduction techniques in electronic systems" av Henry W. Ott [36].

Den totala effekten av en skärm (S) kan tecknas som summan av tre komponenter; Absorption (A), Reflektion (R) och Multipelreflektion (MR). De tre komponenterna beräknas var för sig och betydelsen av olika parametrar, som ex vis skärmens tjocklek eller dess konduktivitet, kan då studeras per komponent.

4.3.1 Grundläggande om vågutbredning

Karakteristiken för ett fält är beroende av dess källa, mediet som det utbreder sig i och avståndet källa–observationspunkt. Nära källan – inom närområdet – bestäms fältet huvudsakligen av källan och på långt avstånd – inom fjärrområdet – bestäms fältet huvudsakligen av mediet det utbreder sig i. Om avståndet är mindre än våglängden λ delat med 2π , befinner man sig i närområdet. Vid 50 Hz är våglängden 6×10^6 m och gränsen mellan när- och fjärrområde hamnar på ett avstånd av närmare 1000 km. Vid kraftfrekvenser behöver man därför i praktiken endast behandla vågutbredning i närområdet.

Den karakteristiska impedansen hos ett medium som en elektromagnetisk våg utbreder sig i kan allmänt tecknas som:

$$Z = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\epsilon}} \quad [5]$$

ω , vinkelfrekvensen, $\omega = 2 \times \pi \times f$

μ , permeabiliteten för mediet, $\mu = \mu_r \times \mu_0 = \mu_r \times 4 \times \pi \times 10^{-7}$ H/m

σ , konduktiviteten för mediet, $\sigma = \sigma_r \times \sigma_0 = \sigma_r \times 5,82 \times 10^7$ S/m

μ_r resp. σ_r är mediets relativa permeabilitet resp. konduktivitet

ϵ , dielektricitetsstalet för ämnet, $\epsilon = \epsilon_r \times \epsilon_0 = \epsilon_r \times 10^9 / 36 \pi$ As/Vm

För isolerande media som luft är $\sigma \ll j\omega\epsilon$ och ekvation [5] kan förenklas till:

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad [6]$$

För ledande media, som en metallisk skärm är $\sigma \gg j\omega\epsilon$ och ekvation [5] förenklas till:

$$|Z_s| = \sqrt{\frac{\omega\mu}{\sigma}} \quad [7]$$

Den skärmande funktionen hos en ledande skärm kan beskrivas med det så kallade inträngningsdjupet, δ , d v s den sträcka in i plåten vid vilken vågens amplitud har dämpats till $1/e \approx 37\%$. Det gäller att:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \quad [8]$$

Effektiviteten, S, hos en skärm och för magnetiskt fält kan allmänt tecknas som:

$$S = 20 \times \text{Log} \left(\frac{H_0}{H_1} \right), \text{ dB} \quad [9]$$

H_0 är amplituden av det infallande fältet, i mediet 1

H_1 är amplituden av det dämpade fältet i mediet 2.

4.3.2 Absorption

När den elektromagnetiska vågen tränger in i skärm med en viss ledningsförmåga kommer amplituden att avta exponentiellt. Detta beror på att vågen inducerar strömmar i skärmen som motverkar fältet.

Skärmningen genom absorption kan tecknas som:

$$A = 20 \times \text{Log} \left(\frac{H_0}{H_1} \right), \text{ dB} \quad [10]$$

och H_1 kan tecknas som:

$$H_1 = H_0 \times e^{-t/\delta} \quad [11]$$

Där t = skärmens tjocklek

$H_0 = 1$ medför att:

$$A = 20 \times (\text{Log } 1 - \text{Log } e^{-t/\delta}) = -20 \times \text{Log } e^{-t/\delta} \quad [12]$$

4.3.3 Reflektion

En elektromagnetisk våg som träffar en gränssyta mellan två medier med de karakteristiska impedanserna Z_1 och Z_2 kommer delvis att reflekteras och delvis att passera in genom gränssytan. Reflektionens storlek är beroende på om skärmen befinner sig i närfältet eller i fjärrfältet. I närfältet beror reflektionen av bl a avståndet r mellan källa och gränssytan och källans form. För en punktformig källa kan reflektionen tecknas som:

$$R = 20 \times \text{Log} \left(\frac{H_0}{H_3} \right), \text{ dB} \quad [13]$$

H_0 = amplituden hos vågen som infaller mot skärmen = 1

H_3 = amplituden hos den våg som passerar ut genom skärmen.

Det gäller vidare att vågimpedansen för fältet från den punktformiga källan kan tecknas som:

$$|Z_p| = 2 \times \pi \times f \times u \times r \quad [14]$$

Fältets amplitud i mediet 2, i skärmen, kan tecknas som:

$$H_1 = 2 \times H_0 \times \frac{Z_1}{(Z_1 + Z_2)} \quad [15]$$

I mediet 3, efter skärmen, kan fältets amplitud tecknas som:

$$H_3 = 2 \times H_1 \times \frac{Z_2}{(Z_1 + Z_2)} \quad [16]$$

Om mediet 1 är luft och 2 en ledande skärm är $Z_1 \gg Z_2$, kan ekvation [15] och [16] förenklas till:

$$H_1 = 2 \times H_0 \times \frac{Z_1}{Z_1} = 2 \times H_0 \quad [17]$$

$$H_3 = 2 \times H_1 \times \frac{Z_2}{Z_1} = 2 \times 2 \times H_0 \times \frac{Z_2}{Z_1} = 4 \times H_0 \times \frac{Z_2}{Z_1} \quad [18]$$

Med $Z_1 = |Z_p|$ (Ekv [14]), $Z_2 = |Z_s|$ (Ekv [7]) samt $H_0 = 1$ fås att:

$$H_3 = 4 \times \frac{\sqrt{\frac{\omega \mu}{\sigma}}}{2 \times \pi \times f \times u \times r} \quad [19]$$

Enligt [13] ovan är $R = 20 \times \text{Log} \left(\frac{H_0}{H_3} \right)$ och med $H_0 = 1$ fås då att:

$$R = -20 \times \text{Log} H_3 = -20 \times \text{Log} \left(\frac{2 \times \sqrt{\frac{\omega \mu}{\sigma}}}{\pi \times f \times u \times r} \right), \text{ dB} \quad [20]$$

4.3.4 Multipelreflektion

I en tunn skärm kan en elektromagnetisk våg först reflekteras mot den andra gränssytan och sedan mot den första. Vågen kan sedan passera ut genom den andra ytan och därmed begränsa skärmens effektivitet. I en tjock skärm kan denna multipelreflektion försummas då absorptionen begränsar amplituden på den reflekterade vågen. För att beräkna en tunn skärms effektivitet måste man därför införa en korrektionsterm för multipelreflektion, som kan tecknas:

$$MR = 20 \times \text{Log} (1 - e^{-2 \times t/\delta}), \text{ dB} \quad [21]$$

Korrektionstermen blir negativ som ett tecken på att skärmens effektivitet blir reducerad

4.3.5 Den sammanlagda effekten av en plan skärm

Den sammanlagda effekten av en tunn plan skärm kan tecknas som:

$$S = A + R + MR \quad (\text{dB}) \quad [22]$$

Det gäller också att $S = 20 \times \text{Log} \left(\frac{H_0}{H_3} \right)$ och därmed att:

$$\text{Skärmfaktorn } \frac{H_0}{H_3} = 10^{S/20} \quad [23]$$

4.3.6 Skärm med hål

I de närmast föregående avsnitten har skärmen förutsatts vara heltäckande och ha samma ledningsförmåga över hela ytan. I praktiken måste man tyvärr räkna med att hål och andra störningar måste tas upp i skärmen. Likaså kan sammanfogningen av enskilda plåtar påverka ledningsförmågan.

Det gäller generellt att öppningar i skärmen har stor betydelse för den totala skärmningen. De kan ha större betydelse för slutresultatet än valet av plåtkvalité, tjocklek etc. Frågan blir givetvis mer kritisk vid högre frekvenser, men även vid 50 Hz skall man eftersträva kontinuerliga plåtytor. En öppning fungerar dels som en antenn för det utträngande fältet och dels som ett avbrott i de strömbanor som cirkulerar i skärmplåten. Avgörande för storleken av denna störning är öppningens största dimension och inte dess yta. Det kan därför vara lämpligt att dela upp en större ventilationsöppning i flera mindre och om möjligt också spridda öppningarna över ytor åt olika håll.

Allmänt gäller att öppningens betydelse som antenn är liten så länge som öppningen är kortare än $1/20$ av våglängden. Vid 50 Hz är våglängden 6000 km och öppningen kan alltså tillåtas bli hela 300 km (!) innan detta blir en fråga av större betydelse.

Vid inklädnad av hela rum förekommer det att man gör speciella lösningar vid ventilationsöppningar och andra större hål i skärmen. Man låter då skärmplåten gå in i trumman 2 - 3 dm för att undvika läckage den vägen. Detta är en helt riktig åtgärd för högre frekvenser, men för kraftfrekvenser och med rimlig hänsyn till övertoner, bör man värdera vad som är rimligt.

Vid inklädnad runt dörrar och portar får inte förbindningen vid golvet glömmas bort. Det kan t ex vara lämpligt att låta tröskeln ingå i skärmen.

Ott [36] beskriver dämpningen i en sådan öppning enligt följande:

För en rund öppning gäller att:

$$f = 6,9 \times 10^9 \times \frac{1}{d} \quad [24]$$

f = gränsfrekvensen

d = öppningens diameter i tum

Vid frekvenser betydligt under denna gränsfrekvens kan skärmningens effektivitet med hänsyn till öppningen beräknas som:

$$S = 32 \times \frac{t}{d} \quad [25]$$

t = öppningens längd, längden av den plåtinklädda rörsektionen

d = öppningens diameter

Vid $d = 5$ tum (12,5 cm) är gränshfrekvensen enligt ekvation [24] $1,4 \times 10^9$, d v s långt över aktuella frekvenser. Skärmningen S blir då med $t = 10$ tum ca 64 dB. Med $H_0 = 1$ fås då att fältet har dämpats till 0,00063 eller 0,063 %.

Vid plåtinklädnad av ställverksrum och vid andra tillfällen då skärmen byggs upp av flera plåtar måste dessa fogas samman med bibehållen god ledningsförmåga. Detta kan lösas genom svetsning eller genom att plåtarna kopplas till varandra med kilförband. Det senare har fördelen att man slipper ett många gånger besvärande arbetsmomentet och som kan kräva omfattande förberedelser. Skruvade förband med kontaktpasta är också en möjlighet och i synnerhet i de fall då en öppningsbar skärm är önskvärd.

4.3.7 Jämförelse mellan numeriska och analytiska beräkningar

Betydelsen av olika parametrar som skärmens tjocklek, dess konduktivitet och avståndet mellan källa och skärm kan med fördel värderas genom att studera deras inverkan på de tre komponenterna och den totala skärmverkan. I de följande exemplen har aktuella värden hämtats från de tidigare numeriska beräkningsexemplen och det blir därför möjligt att jämföra de analytiska resultaten med de numeriska. En viktig faktor att ta hänsyn till är att den analytiska beräkningen förutsätter en oändligt bred skärm, medan de numeriska har utförts med 0,6 – 10 m breda skärmar. Källan för fältet skiljer sig också mellan de två fallen. De analytiska beräkningarna förutsätter en källa som ger upphov till ett fält som träffar skärmen i rät vinkel, medan de numeriska beräkningarna har utförts med 3-fasiga kabelförband som källa.

Inverkan av skärmens tjocklek, t

Indata: 0,6 m bred skärm av Al med $\sigma = 2,326 \times 10^7$ S/m, $\mu = \mu_0$ och med 0,2 m mellan källan för fältet (kabelförbandet) och skärmen.

Inverkan av skärmens tjocklek studerades i avsnitt 4.2.1 och värden hörande till Figur 16 kan användas som referens.

t (mm)	A (dB)	R (dB)	MR (dB)	S (dB)	Num (dB)
2	1,2	13,6	-12,5	2,3	3,5
5	2,9	13,6	-6,2	10,4	9,3
10	5,9	13,6	-2,6	16,9	14,6

Tabell 16. Inverkan av skärmens tjocklek.

Ökad tjocklek ger ökad absorption och därmed minskad multipelreflektion.

Reflektionskomponenten är konstant då reflektionen sker mot samma typ av material, med samma karakteristiska impedans.

Den endast 0,6 m breda skärmen borde ha gett generellt lägre värden med den numeriska metoden jämfört med den analytiska.

Inverkan av skärmens konduktivitet, σ

Indata: 0,6 m bred skärm med $\mu = \mu_0$. 5 mm tjock och med 0,2 m mellan källan för fältet och skärm. $\sigma = \sigma_r \times \sigma_0$

Inverkan av skärmens konduktivitet studerades i avsnitt 4.2.2 och värden hörande till Figur 17 kan användas som referens.

σ_r	A (dB)	R (dB)	MR (dB)	S (dB)	Num (dB)
0,172	1,9	9,9	-8,9	2,9	3,8
0,400	2,9	13,6	-6,2	10,4	9,3
1,000	4,6	17,6	-3,6	18,6	16,4

Tabell 17. Inverkan av skärmens konduktivitet.

Ökad konduktivitet ger ökad absorption och ökad reflektion.

Multipelreflektionen minskar med ökad ledningsförmåga, pga ökad absorption.

Den endast 0,6 m breda skärmen borde ha gett generellt lägre värden med den numeriska metoden jämfört med den analytiska.

Inverkan av avståndet mellan källan för fältet och skärmen, d

Indata: 10 m bred skärm av Al. 5 mm tjock, med $\sigma = 2,326 \times 10^7$ S/m och $\mu = \mu_0$.

Inverkan av avståndet mellan källa och skärm studerades i avsnitt 4.2.3 och värden hörande till Figur 19 kan användas som referens.

d (m)	A (dB)	R (dB)	MR (dB)	S (dB)	Num (dB)
0,1	2,9	7,6	-6,2	4,4	7,2
0,2	2,9	13,6	-6,2	10,4	9,3
0,5	2,9	21,6	-6,2	18,4	15,3

Tabell 18. Inverkan av avståndet mellan källan för fältet och skärmen.

Ökat avstånd mellan källan för fältet och skärmen påverkar inte absorption eller multipelreflektion, då skärmen är av samma typ.

Det ökade avståndet ger en ändrad fältbild och därmed en ökad reflektion.

Skillnaden mellan analytiskt och numeriskt beräknade värden är påtaglig men ändå rimlig med tanke att källan för fältet är så olika i de två fallen. Med hänsyn till detta kan den analytiska metoden väl rekommenderas för överslagsberäkningar och särskilt då vid enklare geometrier med plana skärmar.

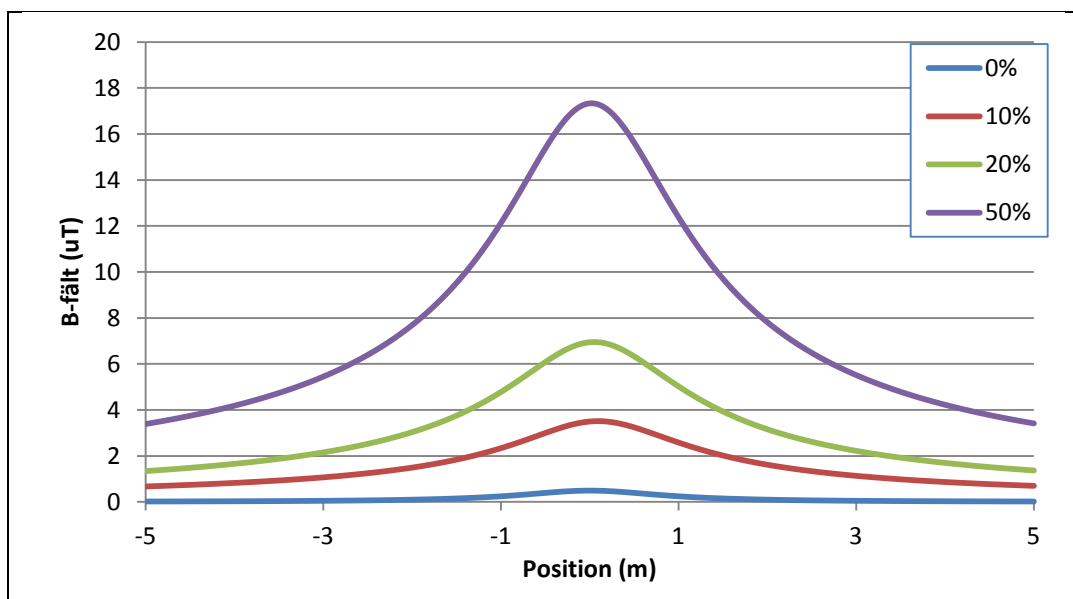
4.4 Kabelförband med osymmetrisk belastning

Vid alla tidigare redovisade beräkningar, både utan och med skärmning, har det antagits att faserna är lika belastade. Värdet 1000 A/fas har valts för att få en enkel bas för magnetfältsberäkningarna. I många fall är emellertid inte alltid belastningen fullt så symmetrisk. Obalans förekommer på mellan-spänningsnivå och framförallt på lågspänningsnivå. Redovisade mätningar i kabelskåp för 400 V visar att fasströmmarna kan skilja drygt +/- 50 % från medelvärdet. För mellanspänning torde avvikelserna vara betydligt mindre.

Obalansen medför att fältet från respektive fas inte kan kompenseras fullt ut av de övriga och att magnetfältet blir betydligt högre än vid symmetrisk belastning. I det följande redovisas två serier av beräkningar med olika grad av osymmetri. Dels ett "mellan-spänningsfall" med 0, 1, 2 och 5 % och dels ett "lågspänningsfall" med 0, 10, 20 och 50 %. I både fallen antas faserna ligga i triangel, med c-c 30 mm för mellanspänning och c-c 20 mm för lågspänning.

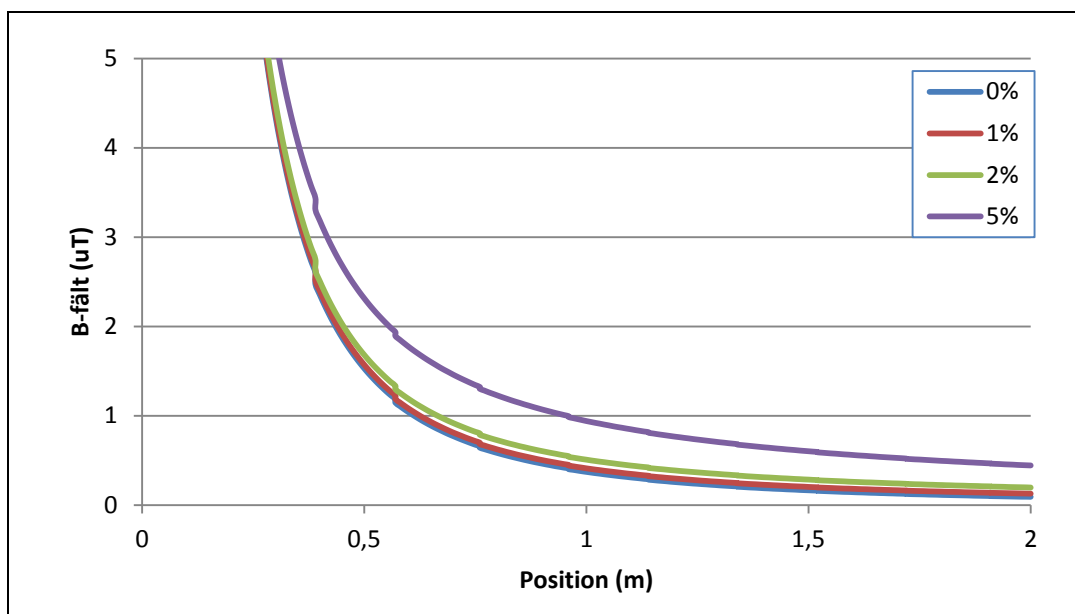
Medelströmmen i mellanspänningsfallet antas vara 50 A och i lågspänningsfallet 100 A.

Det beräknade magnetfältet redovisas för lågspänningsfallet längs en tänkt horisontal linje 1 m ovan kabelförbandet. För mellanspänningsfallet redovisas fältet längs en vertikal linje från förbandets mittpunkt. Se Figur 34 och Figur 35.



Figur 34. Beräknat magnetfält 1 m över kabelcentrum, för tre faser i triangelkonfiguration med fasavstånd 20 mm. Två av faserna avviker med given procentsats från medelströmmen 100 A, ex vis 90, 100, 110 A.

De två exemplen visar att avvikelser på 5 % ger märkbar påverkan på magnetfältet och att vid 10 - 20 % avvikelse från symmetrisk belastning, ändras fältbilden högst påtagligt.



Figur 35. Beräknat magnetfält längs en vertikal linje från kabelcentrum, för tre faser i triangelkonfiguration med fasavstånd 30 mm. Två av faserna avviker med given procentsats från medelströmmen 50 A, ex vis 49, 50, 51 A.

5 Mätningar och instrument

Magnetfält är generellt lätta att beräkna och därtill finns ett omfattande material från mätningar i andra projekt. Behovet av ytterligare mätningar blir därmed ringa, men lite ytterligare har gjorts inom ramen för detta projekt. Några mätningar har utförts invid kabelskåp för lågspänning, invid en transformatoriosk och inne i en mindre 10/0,4 kV station. Magnetfält har även mätts i en tunnel med kabel för 220 kV.

Genomgående har det magnetiska fältet mätts med ett handhållet instrument av fabrikatet Chauvin-Arnoux med beteckning C.A 42. För mätning av den magnetiska fältkomponenten kompletterades handenheten med en prob typ MF 400.

Mer utförliga data för instrument och prob ges nedan:

Instrument: Chauvin-Arnoux C.A 42. Serie nr: 100 359 AEK

Magnetiskt fält (B):

Sensor: MF 400. Serie nr: 100 369 AEK

Ekvivalent yta: 100 cm²

Mätområde: 10 nT – 25 mT

Bandpass filter: 5 Hz – 400 kHz

Onoggrannhet: $\pm 3 \%$ av avläst värde ± 4 siffror

Temperaturdrift: $\pm 1 \%$



Figur 36. Chauvin-Arnoux C.A 42 med prob MF 400.

6 Kabelskåp för lågspänning

De kabelskåp för lågspänning som sitter i distributionsnätets yttre kant kan vara intressanta ur magnetfältssynpunkt. Till skåpen kommer en matande 400 V kabel och ofta går en kabel av samma typ vidare till nästa skåp i slingan. Skåpen är försedda med skenor och till dessa kopplas standardiserade anslutningsdon för var lågspänningsabonnent. Inkommande kabel och skenor kan föra en betydande ström. Det finns standardskåp för märkström upp till 1600 A, men vanligare är skensystem för 400 och 630 A.

Avståndet mellan fasskenorna varierar mellan olika fabrikat, likaså avståndet till PEN-skenan (gemensam skena för skyddsjord och neutralledare). I denna studie har mätningar skett vid ett äldre skåp och vid ett skåp av senare konstruktion. I det äldre skåpet var avståndet mellan fasskenorna ca 190 mm och ca 165 mm mellan närmaste fasskena och PEN-skenan. I det modernare skåpet var avståndet mellan fasskenorna 85 mm och avståndet mellan närmaste fasskena och PEN-skenan ca 335 mm.

Magnetfältet kommer även att bestämmas av skenlängden och framförallt av den längd som en viss ström passerar. Hela systemet bygger på moduler där kapslingar och skenor kan väljas efter behov. Vid de följande beräkningarna har den strömgenomflutna skenlängden satts till 0,8 m. D v s att full ström går in i skenans ena ändpunkt och att samma ström tas ut i den andra ändpunkten. Skåpet kan tänkas sitta i en ringmatning och sakna anslutna abonnenter. Beräkningsfallet motsvarar en ovanlig, men inte helt omöjlig, situation. Det resulterar i ett tämligen enkelt beräkningsfall och som samtidigt ger en bild av ett "värsta fall".

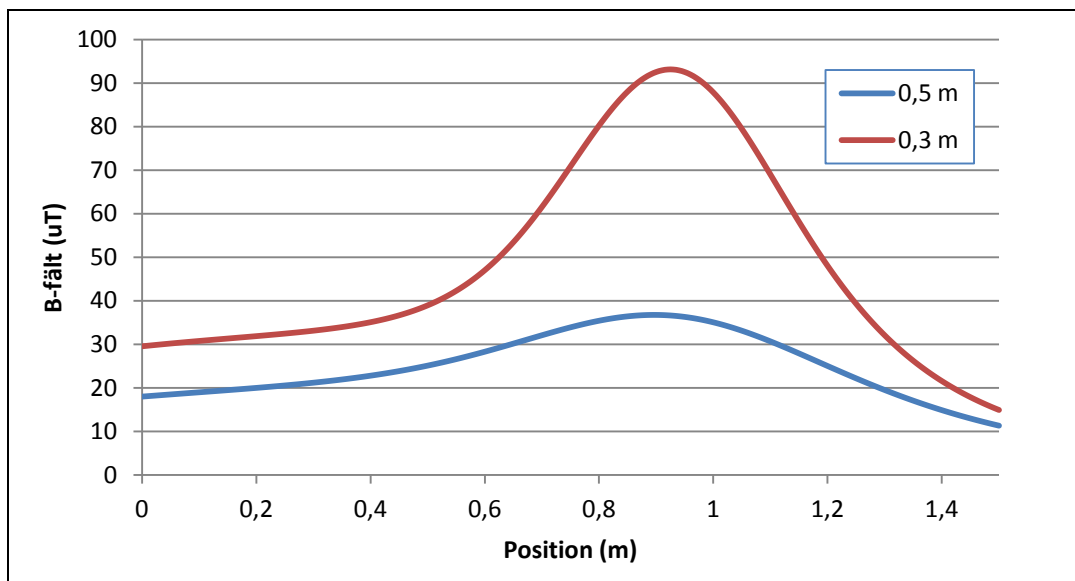
Strömmen är en kritisk parameter vid beräkningarna. I detta fall väljs ett belastningsfall som redovisats i en tidigare Elforsk studie om kabelskåp i stadsmiljö [7]. I det däri beskrivna 4-ledarskåpetskåpet nr 50763 har man mätt upp fasströmmarna 261, 200 respektive 224 A.

I den här använda modellen är i princip hela skenorna strömgenomflutna. I början och slutet av skenan sitter kabelanslutningar och en vertikal kabel som sträcker sig ner till 0,5 m under mark.

Fältet beräknas utan hänsyn till kapsling eller andra detaljer i eller utanför skåpet och detta gör att fältet blir detsamma framför som bakom skåpet. I Figur 37 visas det beräknade B-fältet längs två vertikala linjer 0,3 och 0,5 m framför skåpets skensystem och vid skenornas mittpunkt.

Det högsta B-fältet fås i nivå med skenorna och med ett maxvärde på 93 μT på 0,3 m avstånd och 37 μT på 0,5 m avstånd.

De i den tidigare Elforsk studien redovisade B-fälten skiljer sig mycket från dessa beräknade värden. De är betydligt lägre; ca 15 respektive ca 5 μT . Den stora skillnaden beror på den effektiva skenlängden. Vid beräkningen här har den antagits vara ca 0,8 m och vid den tidigare mätningen var den troligen betydligt kortare, även om någon uppgift om detta inte redovisas i rapporten.



Figur 37. Beräknat B-fält 0,3 och 0,5 m framför ett kabelskåp. Fasströmmar 261, 200 och 224 A. Skenans längd 0,8 m. 0-punkten är vid marknivå.

Troligen är det också så att dessa beräknade värden ligger nära den övre gränsen av vad som överhuvudtaget kan förekomma framför kabelskåp av standardutförande.

Vid arbete i skåpet, som spänningskontroll eller liknande, är det möjligt att montören kommer så nära med huvudet som 0,5 eller t o m möjligen 0,3 m. Detta styrks av Figur 38 som visar en montör från Västerbergslagens Energi i arbete vid kabelskåp av senare konstruktion. Figur 39 visar ett skåp av äldre konstruktion som i vissa fall kan tvinga montören att komma ännu närmare med huvudet, möjligen ner mot 0,3 m från skenorna.

De mätningar som tidigare utförts på kabelskåp har omfattat frekvenser upp till 2 kHz och därmed också innefattat de mest betydande övertonerna. En nu utförd enkel kontroll av övertonernas inverkan på B-fältet vid lågspänningsfördelningen i en mindre transformatorstation 10/0,4 kV, visade på ett 50 Hz B-fält på ca 60 μ T, ett 150 Hz fält på ca 6 μ T (10 %) och ett 250 Hz fält på ca 3 μ T (5 %). Den här enkla kontrollen utfördes utan någon större insats, men kan ändå användas som ett indicium på att övertonernas inverkan på B-fältet måste bedömas som högst måttlig i dessa fall. Säkerligen finns belastningsfall som medför betydligt högre övertonsinnehåll, men marginalen är så stor från det beräknade maxvärdet på knappt 100 μ T till insatsvärdet för arbetstagare på 500 μ T, att man kan acceptera ett inte obetydligt innehåll av övertoner.

Övertonernas betydelse vid en exponeringsbedömning beskrivs bl a i ICNIRP Guidelines 1998 [1]. Med 100 μ T vid 50 Hz, 10 μ T vid 150 Hz och 5 μ T vid 250 Hz fås en sammanvägd exponering av:

$$\frac{100}{500} + \frac{10}{167} + \frac{5}{100} = 0,2 + 0,06 + 0,05 = 0,31.$$

500, 167 och 100 är aktuella insatsvärden vid 50, 150 och 250 Hz.

Då summan är mindre än 1 är exponeringen under insatsvärdet och det krävs ingen vidare åtgärd. Även om övertonsinnehållet skulle öka till 50 μT vid 150 Hz och 30 μT vid 250 Hz, blir den sammanvägda summan inte större än 0,8.



Figur 38. Arbete i ett tämligen nytt kabelskåp från Kabeldon.



Figur 39. Ett äldre kabelskåp från ELGE.

Magnetfältsnivån framför, bakom och på sidorna om ett antal 4- och 5-ledarskåp redovisas utförligt i den omnämnda rapporten från Elforsk och en del uppgifter har redan återgetts i Litteraturöversikten (avsnitt 2.1). Fältet framför skåpen avtar påtagligt med ökande avstånd. På 1 meters höjd ovan mark och 1 m framför skåpens framkant uppmättes mellan 0,2 och 1,0 μT . Fältet bakom skåpen avklingar ungefär lika snabbt. På 1 meters avstånd uppmättes mellan 0,25 och 0,7 μT (omräknat till 100 A). Jämförande mätningar med öppen och stängd frontdörr visar att denna inte har någon påtaglig inverkan vid mät höjden 1,5 m (dvs över skåpets nivå). För mät höjd 1,0 m, är inverkan liten, i storleksordning en skillnad på 0,5 – 1,0 μT för avstånd upp till 0,5 m och på längre avstånd än 1,0 m är skillnaden mycket liten.

7 Arbete invid kablar i tunnel

Förläggning av högspänningskablar i tunnel blir allt vanligare och flera parallella förband ligger ofta i samma tunnel. Magnetfälten från kablar i tunnel har studerats utförligt bl a i samband med utredningar för Stockholms Ström, men då har fokus varit på fält på markytan, där allmänheten kan vistas mer eller mindre stadigvarande. Situationen nere i tunneln har inte studerats i samma omfattning och några exempel på detta kan därför vara intressanta att titta lite närmare på. De två första förläggningsvarianterna har hämtats från det digra utredningsmaterialet för Stockholm Ström och den lägre strömmen på 300 A är också hämtad från samma material. De två högre nivåerna, på 650 A på tre förband och på 800 A på två förband, har däremot satts utan direkt koppling till utredningsmaterialet. Tanken med det högsta alternativet är att ett av tre förband har tagits ur drift och effekten fördelas på de två återstående.

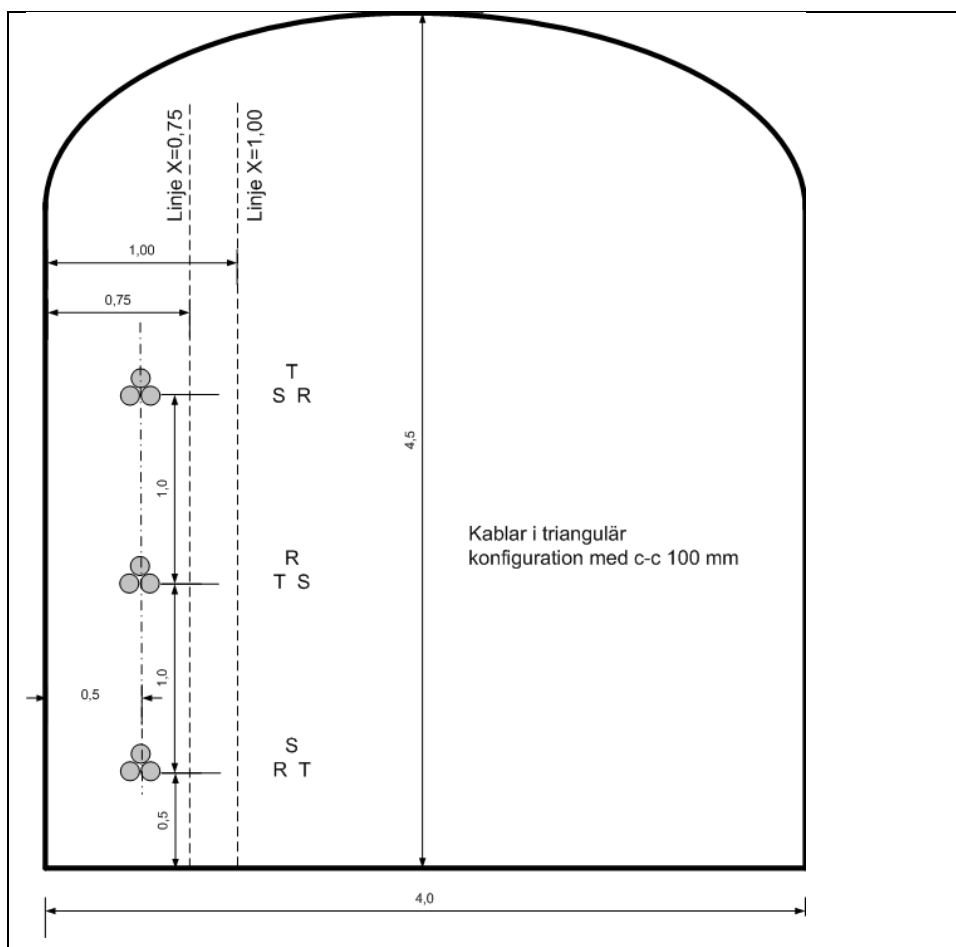
Kablarna ligger i triangulär konfiguration och faserna är arrangerade för att ge minimalt magnetfält på markytan. Avståndet mellan kablarna i respektive förband antas normalt vara 100 mm, vilket stämmer rimligt väl med kablarnas ytterdiameter vid dessa spänningar (220-420 kV) och ledarareor (630 mm^2 -). Kablarna är väl klamrade vid de konsoler som bär upp dem och detta medför att fasavståndet ökar påtagligt, ställvis upp till ungefär det dubbla.

Det kan finnas flera orsaker till att man befinner sig nära kabelförbanden, men det som ger längst exponeringstid och kanske de svåraste arbetsförhållandena, är arbete med en skarv. Sådant arbete kräver att man rör sig runt kabeln och det är då möjligt att man kommer nära andra kablar som är i drift.

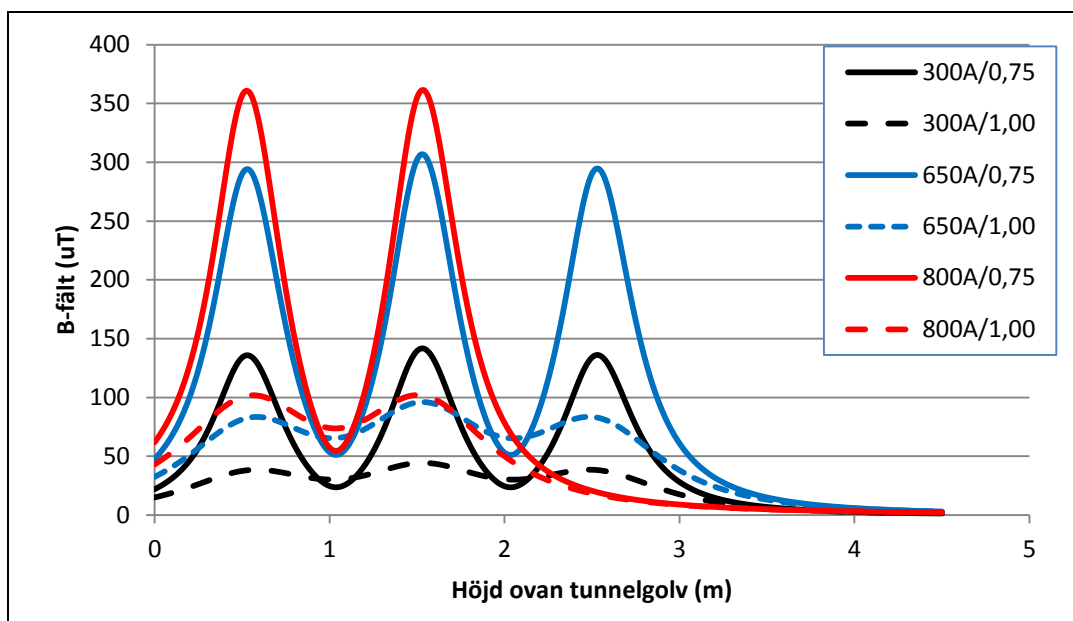
Vid de första beräkningarna, avseende en normalsituation med 100 mm fasavstånd, har det magnetiska fältet beräknats över tunnelytan och längs vertikala linjer från golv till tak. I fallet med tre förband över varandra har fältet beräknats längs linjer 0,75 m och 1,00 m från tunnelväggen. I fallet med två kablar på ena sidan och den tredje vid andra sidan, har de två linjerna kompletterats med en tredje linje 1 m från tunnelväggen. Linjen vid 0,75 m passerar på ca 15 cm avstånd från de närmaste kablarna.

Figur 40 visar en tänkt tunnel med tre kabelförband över varandra och de två beräkningslinjerna. Det beräknade B-fältet visas i Figur 41. De högsta fälten fås givetvis mitt för kabelförbanden, men fältet avtar snabbt med ökat avstånd. Skillnaden mellan 0,75 och 1,00 m är påtaglig. Enligt uttrycket [6] i avsnitt 4.1.3 avtar fältet med avståndet i kvadrat, vilket kan synes rimligt i detta fall.

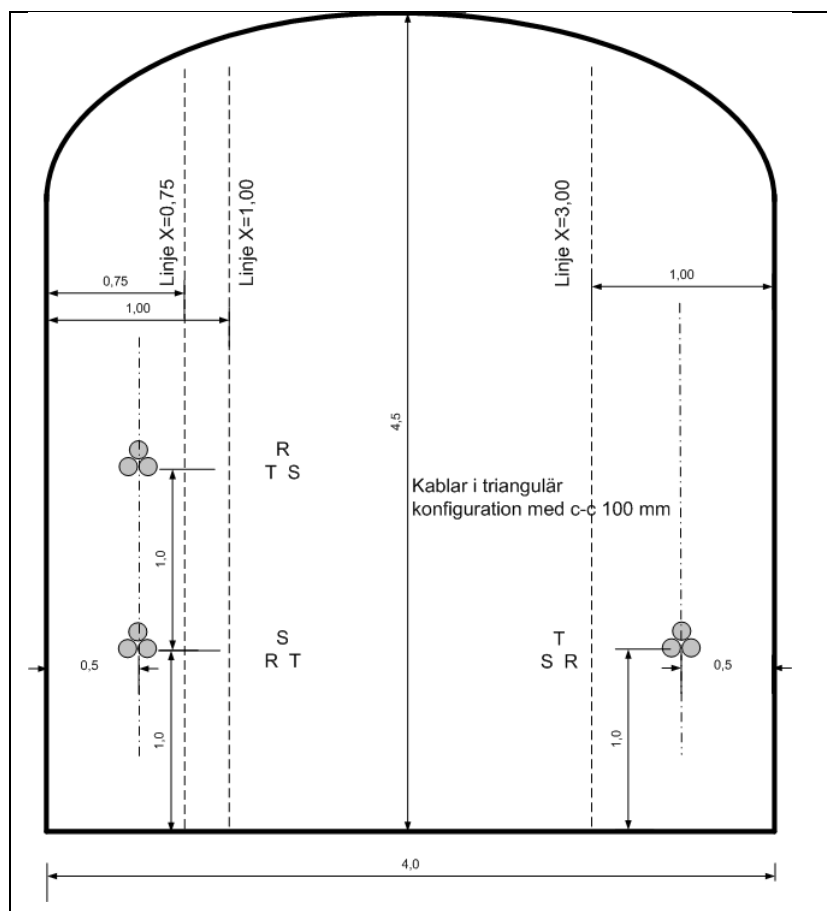
Figur 42 visar det andra alternativet med två förband vid ena väggen. I figurerna visas även fasföljden för de olika förbanden. Det beräknade B-fältet visas i Figur 43 och nivåerna är där något lägre än i föregående exempel.



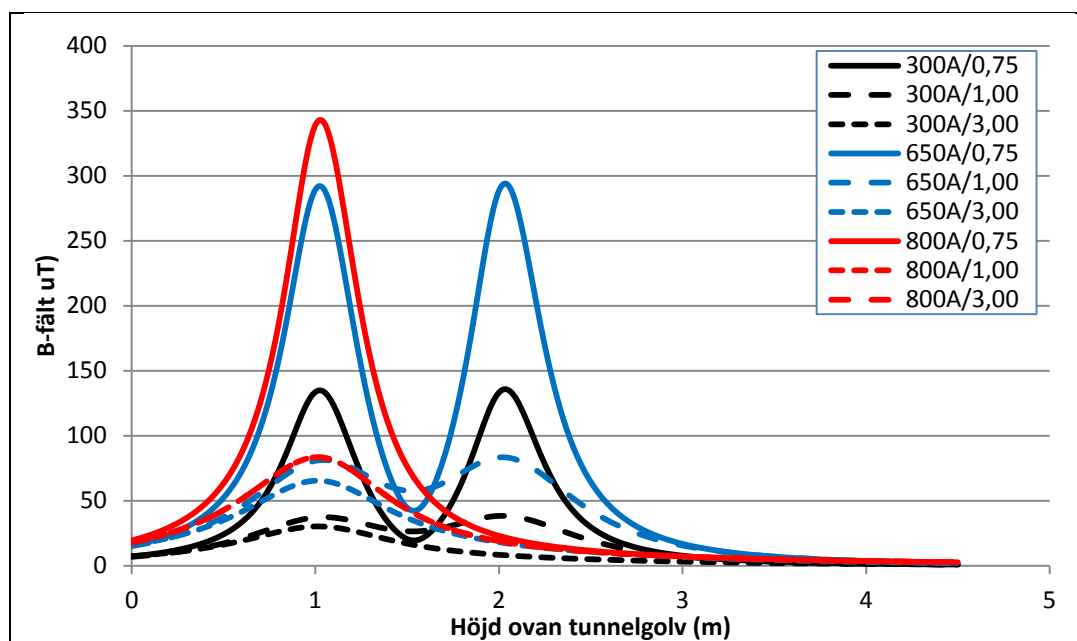
Figur 40. Tunnelsektion med tre kabelförband över varandra.



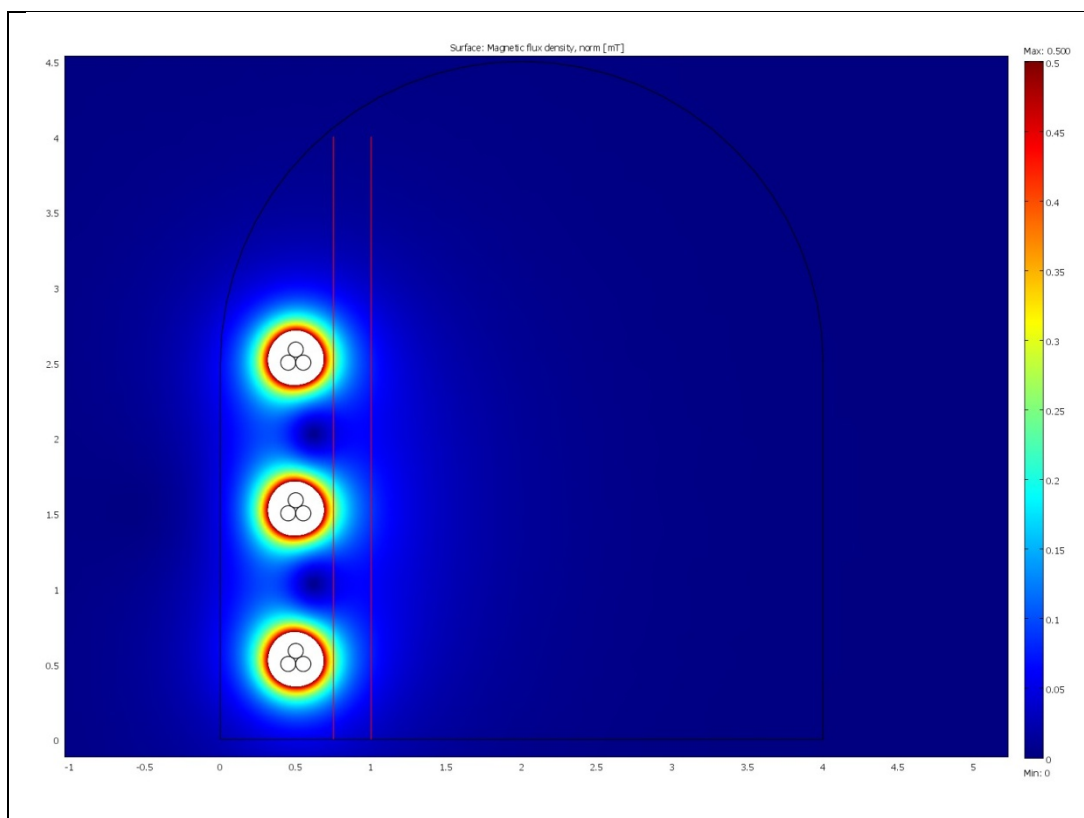
Figur 41. Beräknat B-fält för tunnelsektionen i Figur 40.



Figur 42. Tunnelsektion med två plus ett kabelförband.



Figur 43. Beräknat B-fält för tunnelsektionen i Figur 42.



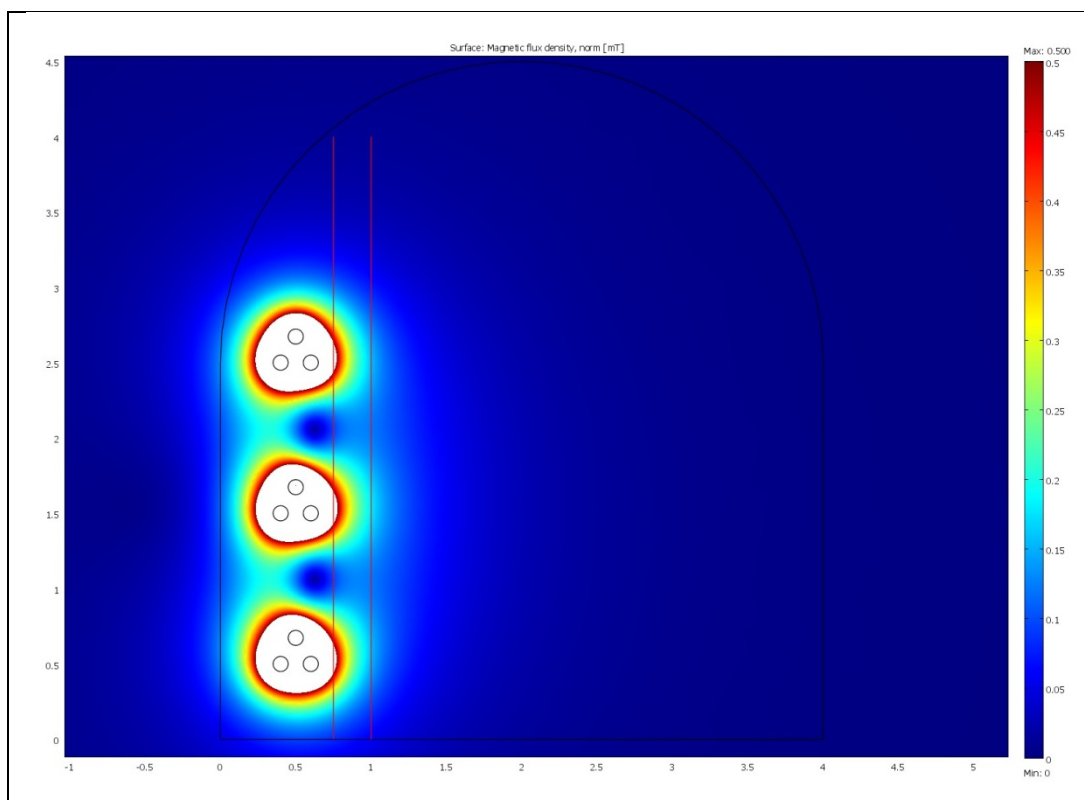
Figur 44. Konturplot av det magnetiska fältet i en tunnel med tre kabelförband i drift och belastade med 650 A var. Kablar med c-c 100 mm. Skalans område sträcker sig till 500 μ T. Vitt anger fält >500 μ T.

Magnetfältet har också beräknats för motsvarande fall med kablarna på 200 mm avstånd från varandra. Fältet fördubblas på samma avstånd, vilket stämmer väl då fältet är proportionellt med fasavståndet. Se Figur 45.

Denna enkla studie visar att det magnetiska fältet blir högt, väl över 500 μ T närmast respektive förband, då tre parallella förband belastas med 650 A. I normalfallet, och med fasavståndet 100 mm uppgår fältet till ca 300 μ T på ett avstånd av ca 150 mm från närmaste kabel. På ett avstånd av ca 400 mm har fältet sjunkit till ca 100 μ T.

Det längre fasavståndet vid upplagspunkterna, 200 mm, ger ungefär det dubbla fältet. Vid 200 mm blir fältet ca 600 μ T på ett avstånd av 150 mm från närmaste kabel. På ett avstånd av ca 400 mm har fältet sjunkit till ca 180 μ T.

Figur 44 och Figur 45 visar att det positioner närmare kablarna och mellan dem, som uppvisar högre fält än 500 μ T, sådana platser bör gå att undvika vid arbete i tunnlar av detta slag.



Figur 45. Konturplot av det magnetiska fältet i en tunnel med tre kabelförband i drift och belastade med 650 A var. Kablar med c-c 200 mm. Skalans område sträcker sig till 500 μ T. Vitt anger fält >500 μ T.

Avslutningsvis utfördes en mätning av magnetfältet i en av Fortums tunnlar i Stockholmstrakten. Mätningen genomfördes mitt på dagen den 6 april 2010 och med de två 220 kV kabelförbanden belastade med totalt ca 828 A. De två förbanden ligger bredvid varandra i tunneln och med faserna i triangulär form. Se Figur 46 och Figur 47. I detta fall var fasavståndet konstant ca 110 mm längs kabeln, oberoende av upplägg på konsoler. Endast skarvarna medförde ökat fasavstånd.

Fältet mättes i ett antal positioner vid sidan om, över och under kablarna. Aktuell ström kontrollerades via driftcentralen. Figur 48 visar uppmätta värden i μ T med röd text. Resultatet visar på en liten osymmetri; över förbandet närmast väggen är fältet 100 μ T och över det andra 85 μ T. Detta kan synas lite märkligt då de två förbanden skall vara lika belastade med ca 414 A i vart förband. Orsaken syns till höger i Figur 47 - en jordlina som sammanbinder ankarskenor och konsoler. I linan går en ström på ca 18 A vid aktuell last och denna ger ett bidrag till fältet över det närmaste förbandet.

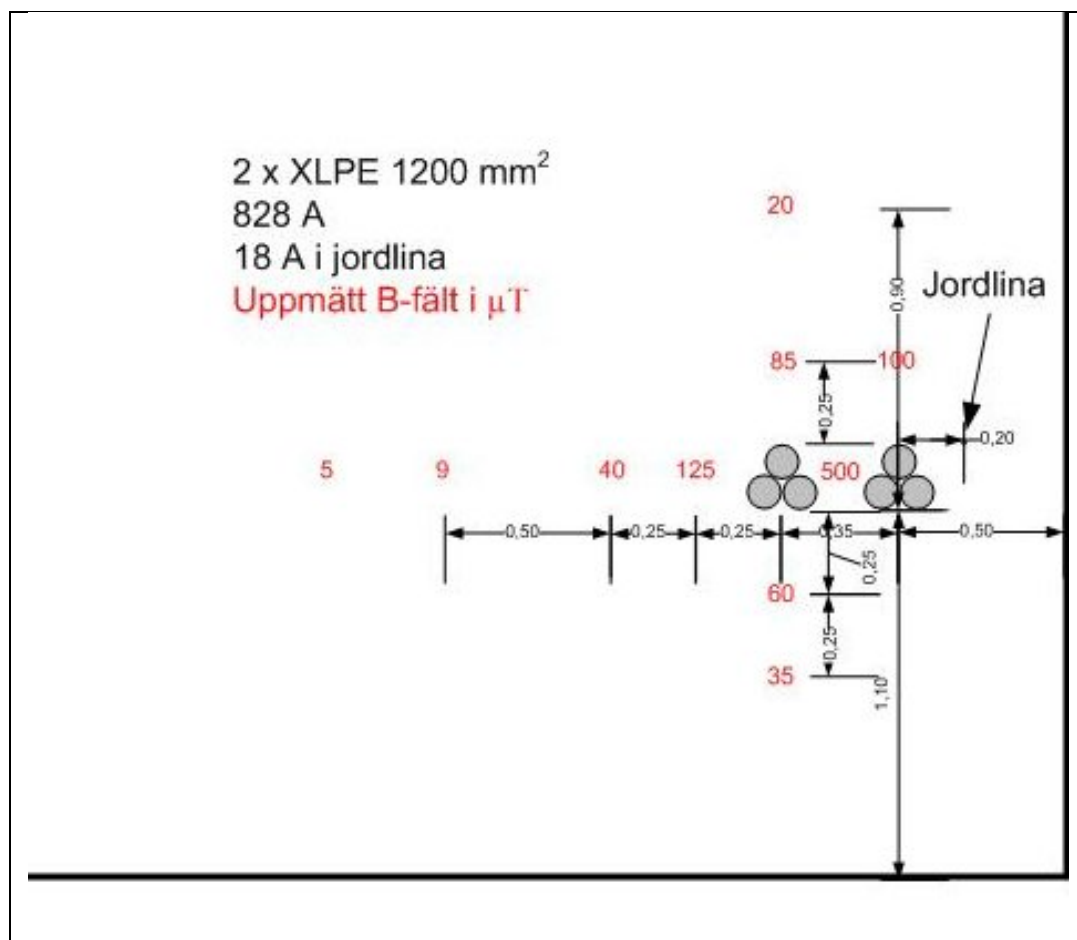
Utförda mätningar visar att man måste komma mycket nära kabelförbanden för att exponeras för fält i storleksordningen 500 μ T. I princip måste man då luta sig mot eller över dem. Förbanden kan naturligtvis belastas betydligt högre än med aktuella 828 A. Gränsen ligger på ungefär det dubbla med



Figur 46. Avsnitt av tunneln med kabelförband.



Figur 47. De två parallella kabelförbanden. Notera linan till höger som jordar ankarskenor och konsoler.



Figur 48. Detalj av tunnelsektion med uppmätta värden på magnetfältet.

hänsyn tagen till area, förläggningssätt och inbördes avstånd. Även vid en högre ström kommer magnetfältet att vara betydligt under 500 μT på något avstånd från kablarna. Det kommer även då att krävas att man i det närmaste lutar sig mot kablarna för att fältet skall överstiga 500 μT . Med denna förläggning är fältet i normal huvudhöjd alltid lägre än den maximala, som fås 1,1 - 1,2 m ovan mark.

8 Slutsatser och rekommendationer

Strömförande kablar är i princip oundvikligen förknippade med yttre magnetfält. Den lilla tvekan som "i princip" ger uttryck för motiveras av den "magnetfältsfria" koaxiala kraftkabeln som ibland används vid banmatning. De två ledarna är där koncentriskt arrangerade och magnetfälten från dem tar ut varandra fullständigt om strömmarna är lika men motriktade. I normala 3-fas fall är denna eleganta lösning inte möjlig och magnetfälten går ej att undvika och ibland blir de också en omtvistad fråga.

Kanske inte omtvistade men väl diskuterade har de riktlinjer eller Guidelines blivit, som den internationella strålskyddsorganisationen ICNIRP publicerade 1998. Dessa Guidelines har utgjort det tekniska underlaget för nationella föreskrifter och till de två dokument som EU givit ut om allmänhetens och arbetstagares exponering. Sommaren 2009 gav ICNIRP ut en remissutgåva till nya och reviderade riktlinjer, men ännu finns ingen slutgiltig version att tillgå. Denna osäkerhet om vad som skall gälla gör det svårt att uttala sig om olika exponeringssituationer; frågan är om man skall basera sin bedömning på de äldre riktlinjerna eller på 2009 års remissutgåva? I detta arbete har båda utgåvorna presenterats.

Omfattande studier har ägnats åt att beräkna magnetfält från transformatorstationer och från kabel i mark och i tunnlar. I flertalet fall har syftet varit att kartlägga fält i de miljöer där allmänheten kan vistas en kortare eller längre tid. Förekommande magnetfält i dessa miljöer är förhållandevis låga, endast lokalt upp mot 4 μT men i allmänhet < 0,4 μT . Goda exempel på sådana studier är bl a de rapporter från Elforsk som rör magnetfält från nätstationer och det omfattande utredningsmaterialet inom ramen för Stockholms Ström. Betydligt mindre arbete har ägnats åt att dokumentera den "elektromagnetiska" arbetsmiljön invid dessa installationer och framförallt då med tonvikt på kortvarig exponering för förhållandevis höga fält. I det här arbetet ligger därför fokus på sådan exponering för magnetfält som är en direkt följd av arbetet.

I bl a tidigare rapporter från Elforsk har man visat på de goda möjligheter som finns att reducera magnetfältet från kabelförband genom lämplig kabelplacering. Här i rapporten har detta följts upp med ett antal genomräknade exempel med olika geometrier och resultatet är entydigt – en påtaglig reduktion av magnetfältet kan enkelt och billigt vinnas genom kompakta arrangemang. Kortare fasavstånd och om möjligt med faserna i triangel ger lågt magnetfält. Vid samma ström och samma fasavstånd minskar magnetfältet till ca 70 % om ett plant horisontellt förband ersätts med ett förband med faserna i triangel.

Skärmning av magnetfält är en betydligt dyrare lösning än en ändring av kabellayouten. Med omsorgsfull skärmning med aluminium och/eller stålplåt kan fältet begränsas med en faktor 10 och i vissa fall än mer. Vid skärmning av rum och större ytor ökar dock svårigheterna och kostnaderna att åstadkomma en ideal skärm, då plåtskarvar och håltagningar kräver mycket

arbete. I praktiken bestäms ofta den totala skärmverkan mer av sådana ofullkomligheter i skärmen än av de släta plåtarnas skärmande egenskaper.

Ett par exempel på mer speciella arbetssituationer har studeras mer i detalj. De kabelskåp för lågspänning som sitter nära lågspänningsabonnenterna har tidigare uppmärksammats i en finsk studie. Man uppmärksammade där montörernas arbetssituation, med huvudet ibland nära tungt belastade skenor och grupper. Stor uppmärksamhet riktades framförallt på övertonsinnehållet och det bidrag till den totala exponeringen som dessa ger upphov till. Mätningar vid kabelskåp har också beskrivits i en tidigare studie från Elforsk. De redovisade magnetfältsnivåerna i denna svenska studie, och framförallt bidraget från övertonerna, är betydligt lägre än i den finska. I detta nu aktuella projekt har några kompletterande mätningar utförts, liksom även beräkningar baserade på en skåpgeometri och belastningar motsvarande ett "värsta fall". Beräkningar visar att den maximala magnetfältsnivån kan uppgå till drygt 90 μT på ett avstånd av 30 cm från skåpets skenor. Vid vissa arbetsoperationer kan montören komma så nära som 30 cm med huvudet, men vanligen är avståndet betydligt längre. Om avståndet ökas till 50 cm, så minskar fältet till knappt 40 μT .

En annan studerad arbetsplats är tunnlar med kabel för 130 – 420 kV. Tunnellösningar blir allt vanligare för att föra in kraft i tätbebyggda områden och de förekommer både i Stockholms- och Göteborgsområdet. En tunnel kan användas för flera parallella förband med kraftkabel, men också för optofiber. Det kan finnas flera anledningar till att vistas i en sådan tunnel, som inspektion av själva tunneln och kontroll av kablarna. En arbetssituation som speciellt har uppmärksammats är skarvning av en kabel i ett förband samtidigt som all last lagts på ett eller två andra förband i samma tunnel. Skarvning av högspänningskabel är ett komplicerat arbete och som kräver full rörlighet runt kabeln. Risken är då stor att man kommer nära de kablar som är i drift. Ett par sådana "tunnelgeometrier" har modellerats och beräknats med olika belastningar; från en normal årsmedellast på 300 A på tre förband till en hög belastning på 800 A på två förband. Resultatet visar inte oväntat på ett högt magnetfält närmast kablarna, lokalt över 500 μT . Storleken av fältet är direkt proportionellt mot strömmen och fasavståndet inom respektive förband. Ligger kablarna tätt ihop blir fasavståndet ca 100 mm och fältet blir då ca 300 μT på ett avstånd av 15 cm från mantelytan. På 40 cm avstånd har fältet sjunkit till ca 100 μT . Fältet avtar med avståndet i kvadrat från kablar som ligger i triangulär konfiguration. I de punkter där kablarna fixerats till konsolerna kan fasavståndet bli större och fältet likaså. En kontrollmätning i en tunnel med två parallella 220 kV förband upplagda på samma höjd och med konstant fasavstånd ca 110 mm visar att beräkningarna är rimliga. Vid en totalström i förbanden på 828 A uppmättes 125 μT på 0,25 meters avstånd. Vid arbete i kabeltunnel krävs uppmärksamhet. Man skall inte onödigtvis luta sig in över strömförande kablar, utan försöka upprätthålla det avstånd som konsolerna anvisar. Detta gäller främst huvud, bål och rygg, när det gäller armar och ben kan man tillåta sig vara mindre restriktiv.

Avgörande för magnetfältets storlek i ett kabelförband är belastningen på de olika faserna. Symmetrisk belastning med strömmarna fasförskjutna 120 ° ger förutsättning för att fältet från faserna skall kunna ta ut varandra i större eller mindre grad. I de ideala fallen är magnetfältet lätt att beräkna och kan enkelt uppskattas med enkla uttryck. Är belastningen däremot osymmetrisk, ökar

fältet snabbt med graden av osymmetri. Samma typ av problem uppstår när strömmen tar "fel väg" och går i gemensam skydds- och nolledare (PEN) eller i vattenrör och andra oavsiktliga ledare. I kabelskåp för lågspänning sitter denna PEN-skena på ett visst avstånd från fasskenorna och en ström i denna ger ett oproportionerligt stort bidrag till det totala magnetfältet runt skåpet. Osymmetrisk belastning och ström i PEN-ledare torde dock vara nästintill oundvikliga inslag i dagens distributionsnät och frågan om fält och exponering måste om den blir aktuell lösas på annat sätt. Mycket kan vinnas genom att anpassa arbetet och upprätthålla ett något större avstånd mellan huvud och skåp. Om det kortaste avståndet kan ökas från 30 cm till 50 cm, kan exponeringen mer än halveras.

Det sades inledningsvis att magnetfälten är i princip oundvikliga, men fältens nivå och graden av exponering är många gånger en fråga om förutseende och planering. Det mest verkningsfulla och kostnadseffektiva lösningarna för att begränsa magnetfält utförs i allmänhet redan på planeringsstadiet. Att ändra något i efterhand riskerar många gånger bara att bli en dyr kompromiss mellan vad som är tekniskt önskvärt och praktiskt genomförbart. Tekniska lösningar kan ibland med fördel kombineras med ett något anpassat arbetssätt. Då magnetfälten minskar fort kan en liten förflyttning ge en stor förbättring.

9 Referenser

- 1 ICNIRP Guidelines. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electro-magnetic fields (up to 300 GHz). Health Physics April 1998, Volume 74, No 4. pp 494 – 522.
- 2 Draft ICNIRP Guidelines. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz). 29 July 2009.
- 3 Magnetfält från kabelnät i stadsmiljö. Elforsk rapport 97:28 B. 1997.
- 4 Holmström, Sture; Kemmlert, John; Grape, Ulf och Larsson, Anette: Möjligheter att reducera magnetfält. Teori och praktik. Elforsk rapport 00:31. 2000.
- 5 Holmström, Sture; Kemmlert, John; Larsson, Anette och Grape, Ulf: Konstruktioner för att erhålla låga magnetfält i distributionsanläggningar. Elforsk rapport 02:33. 2002.
- 6 Holmström, Sture; Grape, Ulf och Larsson, Anette: Nätstation med lågt magnetfält. Elforsk rapport 04:47. 2004.
- 7 Öhrn, Lars Erik; Pralits, Hans; Selin, Arne och Larsson, Anette: Magnetfält kring kabelskåp i stadsmiljö. Elforsk rapport 04:60. 2005.
- 8 Keikko, Tommie; Seesvuori, Reino; Kalliomäki, Pentti and Pihlajamaa, Jouko: Occupational magnetic field exposure in working nearby low voltage switchgears. CIREN. Turin 6-9 June 2005.
- 9 Zucca, Mauro and Ribaldone, Paolo: Magnetic field mitigation above a double trefoil HV underground power line. CIREN. Turin 6-9 June 2005.
- 10 Hearn, David; Luternauer, Hanruedi and Schiesser, Hans-Heinrich: Electromagnetic field mitigation techniques applied to MV/LV substations. CIREN. Vienna 21-24 May 2007.
- 11 Keikko, Tommi; Kettunen, Kati; Hyvönen, Martti; Seesvuori, Reino and Valkealahti, Seppo: Validation and analysis of a magnetic field measurement method to be utilized in indoor MV/LV substations. CIREN. Vienna 21-24 May 2007.
- 12 Kettunen, Kati; Keikko, Tommi; Hyvönen, Martti and Valkealahti: Magnetic field categorization in indoor MV/LV substations by the structure of the low-voltage connection. CIREN. Vienna 21-24 May 2007.
- 13 Mitigation techniques of power-frequency magnetic fields originated from electric power systems. Cigré Guide 373. February 2009.
- 14 IEC/TR 62271-208:2009-10. High-voltage switchgear and controlgear – Part 208: Methods to quantify the steady state, power-frequency electro-magnetic fields generated by HV switchgear assemblies and HV/LV prefabricated substations.

- 15 Rådets rekommendation av den 12 juli 1999 om begränsning av allmänhetens exponering för elektromagnetiska fält (0Hz – 300 GHz). (1999/519/EG)
- 16 Statens strålskyddsinstituts allmänna råd om begränsning av allmänhetens exponering för elektromagnetiska fält; beslutade den 28 oktober 2002. SSI FS 2002:3.
- 17 Europaparlamentets och rådets direktiv 2004/40/EG om minimikrav för arbetstagares hälsa och säkerhet vid exponering för risker som har samband med fysikaliska agens (elektromagnetiska fält) i arbetet (18:e särdirektivet enligt artikel 16.1 i direktiv 89/391/EEG).
- 18 Proposal for a Directive of the European Parliament and the Council amending Directive 2004/40/EC on minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risk arising from physical agents (electromagnetic fields) (eighteenth individual Directive within the meaning of Article 16(1) of Directive 89/391/EEC). Brussels, 26.10.2007. COM(2007)669 final. 2007/0230(COD).
- 19 Dawson, T W; Caputa, K and Stuchly, M A: High-Resolution Organ Dosimetry for Human Exposure to Low-Frequency Electric Fields. IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 13. No. 2 April 1998. pp 366-373.
- 20 Dawson, T W and Stuchly, Maria A: High Resolution Organ Dosimetry for Human Exposure to Low-Frequency Magnetic Fields: IEEE Transactions on Magnetism. Vol 34. No. 3. May 1998. pp 708-718.
- 21 Dawson, T W and Stuchly, Maria, A: Effects of skeletal muscle anisotropy on human organ dosimetry under 60 Hz uniform magnetic exposure. Physics in medicine and biology. No. 43. 1998. pp 1059-1074.
- 22 Dimbylow, P: Development of the female voxel phantom NAOMI, and its application to calculations of induced current densities and electric fields from applied low frequency magnetic and electric fields. Physics in Medicine and Biology. Vol. 50. 2005. pp 1047-1070.
- 23 Bahr, A; Bolz, T and Hennes, C: Numerical dosimetry ELF: Accuracy of the method, variability of models and parameters, and the implication for quantifying guidelines. Health Physics. No. 92(6). 2007. pp 521-530.
- 24 Hirata, A; Wake, K; Watanabe, S and Taki, Masao: In-situ electric field and current density in Japanese male and female models for uniform magnetic field exposures. Radiation Protection Dosimetry. Vol. 135. No. 4. 2009. pp 272-275.
- 25 Stuchly, M A and Dawson, T W: Human body exposure to power lines: Relation of induced quantities to external magnetic fields. Health Physics. Sep 2002. Vol. 83. No. 3. 2002. pp 333-340.
- 26 Wertheimer, Nancy and Leeper, Ed: Electrical wiring configurations and childhood cancer. American Journal of Epidemiology. Vol 109. No 3. 1979 pp 273-284.
- 27 Lundberg, Petra och Lindgren, Rolf: EMF-forskningen 1993-2003. Elforsk rapport 05:10.

- 28 Ahlbom, Anders; Cardis, Elisabeth; Green, Adele; Linet, Martha; Savitz, David and Swerdlow, Anthony. (ICNIRP Standing Committee on Epidemiology): Review of the Epidemiologic Literature on EMF and Health. Environmental Health Perspectives. Vol 109. Supplement 6. Dec 2001. pp 911-933.
- 29 Myndigheternas försiktighetsprincip om lågfrekventa elektriska och magnetiska fält. En vägledning för beslutsfattare. Arbetarskyddsstyrelsen, Boverket, Elsäkerhetsverket, Socialstyrelsen och Statens Strålskyddsinstitut. 1995.
- 30 Magnetfält och hälsorisker. Broschyr utgiven av Arbetsmiljöverket, Boverket, Elsäkerhetsverket, Socialstyrelsen och Strålsäkerhetsmyndigheten. 2009.
- 31 IARC Monograph. Non-Ionizing Radiation, Part 1: Static and Extremely Low-Frequency (ELF electric and magnetic fields. Vol 80. 2002.
- 32 Ulf Bergqvist, Lena Hillert och Elisabeth Birke. Elöverkänslighet och hälsorisker av elektriska och magnetiska fält. Rådet för Arbetslivsforskning. 2000.
- 33 Miljömanualen. Miljöstiftelsen för byggsektorn. 2000.
- 34 Reduktion av magnetfält från kraftledningar. Elsäkerhetsverket 2002.
- 35 SS-EN 50499. Utgåva 1. 2009-04-27. Tillvägagångssätt för bedömning av arbetstagares exponering för elektromagnetiska fält.
- 36 Ott, Henry W. Noise reduction techniques in electronic systems. Second edition. John Wiley & Sons. 1988.

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