

Bilaga 2. Teknikval

1 VAL AV TEKNIKALTERNATIV

1.1 Bakgrund

I det genomförda avgränsningssamrådet klargjorde GEAB att ett utförande som luftledning förordas främst av driftsäkerhetstekniska hänsyn och kostnadsskäl. De inkomna yttrandena från privatpersoner kan sammanfattas som ett närmast enigt motstånd mot luftledning, se samrådsredogörelsen (bilaga 1 till MKB). Nämnas i sammanhanget bör dock att 826 direktinbjudningar till samråd skickades ut till särskilt berörda privatpersoner och att samrådet även annonserades i dagspressen för att nå en större allmänhet. Det var dock endast fem yttranden som inkom från privatpersoner. Myndigheter, organisationer med flera hade inte några invändningar mot luftledning. Lik- som för aktuell ledning dominerar krav på markförläggning av nya kraftledningar oftast samrådet inför tillståndsansökan. Eftersom markförlagda ledningar medför en ytterst begränsad synlig påverkan på omgivningen är det naturligt att de externa intressenter som berörs av en ny kraftledning förespråkar att den markförläggs istället för att byggas som en trädsäker luftledning (det vill säga med skogsgata).

För de mindre lokalnätledningarna (0,4- 20 kV) dominerar markförlagda ledningar och icke trädsäkra lokalnätledningarna markförläggs kontinuerligt. 70 % av Vattenfall Eldistribution (VFED, som äger 75 procent av GEAB) lokalnät är i dag markförlagt. De större regionnätledningarna byggs däremot normalt som trädsäkra luftledningar och dessa större kraftledningar markförläggs främst i tätbebyggda stadsmiljöer där fysiskt utrymme för luftledning saknas. Endast 1,8 % av VFED:s 130 kV-nät är utfört som markförlagda ledningar. Den stora skillnaden mellan andelen markförlagda lokalnätledningarna respektive regionnätledningarna förklaras av vitt skilda tekniska och ekonomiska förutsättningar beträffande teknikvalet markkabel/luftledning inom lokalnät respektive regionnät. Eftersom markförläggning av luftledningar pågår i stor omfattning för lokalnätledningarna med lägre spänningsnivå är det fullt förståeligt att det finns en uppfattning att markförläggning av större regionnätledningarna kan ske i samma omfattning. Så är inte fallet utan de tekniska utmaningarna med markförläggning av kraftledningar ökar med stigande spänningsnivå.

I september 2020 tog VFED ett principbeslut om att generellt förordna luftledning som teknikval för kraftledningar med spänningsnivå 130 kV eller högre. I avsnitten 1.2 – 1.7 nedan presenteras principbeslutet samt skälen för det såväl generellt samt specifikt för nu aktuell 145 kV-ledning Ygne-Hemse. Ytterligare motiveringar kring olika aspekter av teknikvalet återfinns i GEAB:s bemötanden av yttranden i det genomförda samrådet (se bilaga 1 till MKB). GEAB:s uppfattning är att inget av yttrandena redovisar några sakförhållanden som utgör grund för att välja markkabel istället för luftledning. Utöver den översiktliga kostnadsberäkningen (se avsnitt 1.6 nedan), har GEAB därför inte utrett alternativet att bygga den planerade ledningen, helt eller delvis, som markförlagd kabel.

Med anledning av den omfattande utbyggnad av elnätet som krävs för att klara den pågående energiomställningen har regionnätsföretagen Ellevio, E.ON Energidistribution, Jämtkraft, Skellefteå Kraft Elnät och VFED samt Affärsverket svenska kraftnät i januari 2021 lämnat förslag till regeringen på åtgärder för att säkerställa utbyggnaden av elnätet (Affärsverket svenska kraftnät m.fl. 2021). Av skrivelsen framgår att de undertecknade regionnätsföretagen generellt förordar luftledning på de högre spänningsnivåerna bland annat därför att de tekniska problemen med att i stor omfattning använda markkabel på de högre spänningsnivåerna skulle bli mycket svårhanterliga och leda till minskad driftsäkerhet.

Mot bakgrund av ovanstående, vilket förtydligas i följande avsnitt, står GEAB fast vid teknikvalet luftledning för den aktuella kraftledningen.

1.2 VFED:s/GEAB:s principbeslut avseende teknikval mellan luftledning och markkabel på spänningsnivåer 130 kV eller högre

Luftledning är den teknik som VFED/GEAB generellt förordar på spänningsnivåer 130 kV eller högre då det är den tekniska lösning som ger ett säkert, tillförlitligt och effektivt elnät till lägsta kostnad för våra kunder. De huvudsakliga skälen till att luftledning förordas anges i korthet i punkterna nedan. Termer som kan uppfattas som tekniska ges närmare förklaringar i texterna som följer längre ner.

- Enligt ellagen ska nätägaren ansvara för att dess ledningsnät är säkert, tillförlitligt och effektivt och för att det på lång sikt kan uppfylla rimliga krav på överföring av el. Begreppen i ellagen understöder ställningstagandet att generellt förordas luftledning som teknisk lösning i 130 kV-nätet.
- De tekniska problemen med att i stor omfattning förlägga markkabel i 130 kV-nätet skulle bli mycket svårhanterliga och leda till minskad driftsäkerhet. Som exempel kan nämnas risk för resonansfenomen och spänningstransienter, ökat antal felkällor med långa reparationstider, oönskade effektlöden i nätet och mindre möjligheter till maskad driftläggning med momentan reserv för anslutna kunder.
- Luftledning är generellt sett ett betydligt mer kostnadseffektivt alternativ jämfört med markkabel. Samhället får ut totalt sett mycket mer kundnytta för varje investerad krona i 130 kV-nätet om luftledning används istället för markkabel. Därmed kan fler samhällsbehov tillgodoses med luftledningar jämfört med markkabel. Detta är i linje med VFED:s/GEAB:s uppdrag om att tillhandahålla ett effektivt elnät.
- Markkabel kan utifrån ovan beskrivna anledningar endast förordas på korta sträckor där luftledning inte är möjligt på grund av brist på fysiskt utrymme, till exempel i radiella stadsnät. Som försiktighetsprincip och för att leva upp till likabehandling av markägare och övriga berörda intressenter, kan kabel därför bara förordas där fysiskt utrymme för luftledning saknas.

VFED:s/GEAB:s ställningstagande gällande teknikval för spänningsnivå 130 kV eller högre innebär att luftledning generellt ska förordas i ansökningar om nätkoncession för linje. Detta gäller för alla typer av ärenden: nya ledningar avsedda att ansluta kunder, förstärkningar och reinvesteringar i befintligt nät, samt flytt av befintliga ledningar som initierats av kunder eller andra intressenter. I följande avsnitt utvecklas skälen till ställningstagandet.

1.3 Nätägarens roll och ansvar

Enligt 3 kap. 1 § i ellagen ansvarar ett företag som bedriver nätverksamhet för drift och underhåll och, vid behov, utbyggnad av sitt ledningsnät och, i tillämpliga fall, anslutning till andra ledningsnät. Företaget svarar också för att dess ledningsnät är säkert, tillförlitligt och effektivt och för att det på lång sikt kan uppfylla rimliga krav på överföring av el. Hur nätägaren väljer att dimensionera sitt nät och väljer tekniska lösningar påverkar direkt både personsäkerhet och tillförlitlighet. Ett relevant mått på effektiviteten är hur många MW som kan överföras eller anslutas till en viss kostnad. Nätföretaget får betalt för sina kostnader via tariffen. Det finns dock begränsningar för hur mycket ett nätföretag kan investera såsom exempelvis nätföretagets skuldsättning, nivån på tariffer som samhället accepterar, interna och externa resurser för projektering och byggnation av ledningar samt möjligheter att göra avbrott i elnätet för att koppla in nya delar (med bibehållen driftsäkerhet).

Givet att nätföretaget har en viss ram för investeringar behöver samhället få ut så mycket som möjligt av dessa medel. Samhället får ut totalt sett mycket mer nytta och driftsäkerhet för varje investerad krona på spänningsnivån 130 kV om luftledning används istället för markkabel. Nätföretaget kan därmed tillgodose fler samhällsbehov med luftledning jämfört med markkabel. Ett effektivt elnät är säkert, tillförlitligt, har låga förluster och erbjuder hög kapacitet vid varje ny investering. Nätägaren behöver beakta alla dessa aspekter för att leva upp till sin roll.

Den som har nätkoncession för linje är skyldig att på skäliga villkor ansluta en elektrisk anläggning till ledningen och anslutningen ska normalt fullgöras inom två år från att en begäran om anslutning mottagits. Detta är ett utmanande krav för nätägaren. När en elektrisk anläggning ska anslutas innebär det ofta att elnätet måste förstärkas. I praktiken är alltså nätägaren enligt lag skyldig att uppföra även de ledningar som möjliggör anslutningen. Nya ledningar byggs antingen för att det finns en kund som vill anslutas och enligt lag har rätt till det, eller för att tillgodose de samlade kundernas behov av el (det vill säga samhällets behov). Sådana behov är exempelvis nya bostadsområden eller ny infrastruktur såsom tunnelbana och laddstationer för elbilar. Elnäten är den mest samhällskritiska infrastrukturen vi har och det är avgörande att de fungerar väl.

Nätföretagen är monopolverksamhet och regleras därmed. Reglermyndigheten Energimarknadsinspektionen övervakar nätägare. Det är alltid kunderna som betalar för de investeringar nätägaren gör i sitt nät. Om nyttan av investeringen enbart tillfaller en ny kund är det den kunden som betalar hela investeringen med en så kallad anslutningsavgift. Om nyttan delvis tillfaller en ny kund och till resterande del är till nytta för befintliga kunder delas anslutningsavgiften. En del betalas då av den nya kunden och resten av kostnaden fördelas på nätägarens kundkollektiv via tariffen. Nyttan av nätförstärkningar och reinvesteringar som inte orsakas av enskilda kunder kommer kundkollektivet till godo och betalas därför i sin helhet via tariffen.

Den som har nätkoncession är skyldig att på skäliga villkor överföra el för annans räkning. Överföringen av el ska vara av god kvalitet. En nätkoncessionshavare är skyldig att avhjälpa brister i överföringen, i den utsträckning kostnaderna är rimliga i förhållande till de olägenheter för elanvändarna som är förknippade med bristerna. Det finns mått som anger vad som är tillräcklig elkvalitet. Att avhjälpa brister innebär ofta kostsamma åtgärder i anläggningarna. Det ingår således i nätägarens uppdrag att upprätthålla kvalitén och genomföra nödvändiga investeringar för detta. En nätkoncessionshavare är skyldig att se till att avbrott i överföringen av el till en elanvändare aldrig överstiger tjugofyra timmar. Detta är ett lagkrav medan Energimarknadsinspektionens föreskrift föreskriver högre krav relativt uttagseffektens storlek. Detta krav dimensionerar den nivå på driftsäkerhet en nätägare behöver upprätthålla och har därmed stor inverkan på hur nätägaren tekniskt utformar elnätets anläggningar.

1.4 Elnätets utformning samt driftsäkerhet

1.4.1 Markkabel i lokalnätet, luftledning i regionnätet

Det svenska elsystemet brukar delas in i lokalnät, regionnät och stamnät. Lokalnätet (vanligtvis 0,4-22 kV) ligger närmast hushållen och de flesta företag med måttlig effektnivå. Regionnätet (vanligtvis 40-130 kV) fördelar effekten från stamnätet ut till landets regioner där det matar antingen det underliggande lokalnätet alternativt kunder med stora effektbehov såsom tyngre industrier. Det nationella stamnätet (220 eller 400 kV) fördelar ut effekten i landet från de stora kraftstationerna samt förbinder Sveriges elnät med våra grannländer.

För att ett elnät ska vara tillförlitligt behöver det hålla en viss nivå av driftsäkerhet. Nätägare har ett långtgående ansvar att säkerställa att avbrott inte uppstår och att de åtgärdas snarast. Stam- och regionnäten i Sverige och på de flesta håll i världen dimensioneras enligt det så kallade N-1 kriteriet. Det innebär att elsystemet ska klara att tappa en godtycklig komponent, exempelvis en ledning eller en transformator, utan

att det blir avbrott i elnätet. Regionnätet byggs normalt som trädsäkra luftledningar då det är den konstruktion som ger högst driftsäkerhet och lägst kostnader på aktuell spänningsnivå. En trädsäker regionnätledning byggs i en ledningsgata som är tillräckligt bred, normalt 36-40 meter, så att inget träd intill luftledningen kan falla på den och orsaka avbrott. Den ytterst lilla andel av 130 kV-nätet som är markförlagd återfinns främst i tätbebyggd miljö där fysiskt utrymme för luftledningar saknas.

Eftersom lokalnätet är många gånger längre än regionnätet, samt i större utsträckning är byggt närmare bostadsbebyggelse är det inte rimligt att hålla det elnätet trädsäkert då det skulle innebära att stora markytor skulle undantas från ett aktivt skogsbruk. Skillnaderna mellan trädsäkra och icke trädsäkra luftledningar ur ett driftsäkerhetsperspektiv kan exemplifieras med stormen Alfrida. Inget avbrott uppstod då på VFED:s trädsäkra regionnät medan stora delar av det icke trädsäkra lokalnätet slogs ut. Om det hade varit möjligt att ha ett trädsäkert lokalnät så hade inte den omfattande kablifiering, som skett på grund av ellagens krav och som medfört att huvuddelen av lokalnätet är markförlagd, genomförts. Markförläggning av lokalnätsskabel är också betydligt enklare anläggningstekniskt då dessa är mycket mindre än regionnätsskabel vilket medför mindre miljöpåverkan vid förläggningen.

Ser man på elnäten nedifrån lågspänning är delen närmast kund alltid radiell (trädstruktur). Vid ett fel innebär detta att kunden blir spänningslös tills felet reparerats eller omkoppling (som ofta sker automatiskt) har skett. Högre upp i kedjan på regionnätet finns det andra matningsvägar som kan kopplas in snabbt vid ett fel på en ledning i nätet. Ett sådant nät är maskat vilket innebär att det har en nätstruktur liknande ett spindelnät med flera möjliga matningsvägar till varje station. Antalet alternativa matningsvägar i region- och stamnät beror på hur mycket effekt som ska distribueras och huruvida det rör sig om markkabel eller luftledningar. Avgörande är konsekvensen vid ett fel i systemet. Energimarknadsinspektionen har krav på avbrottstider kopplade till effektstorlek (Eifs 2013:1).

Stora markkabelsystem över 100 kV förekommer normalt endast i städer och kännetecknas av att de drivs radiellt och normalt är dimensionerade enligt N-2 kriteriet. Det innebär att varje station i regel har tre matningsvägar, det vill säga att man kan klara två markkabelfel, vilket ansetts vara en rimlig riskavvägning. Skulle ett avbrott ske så kan omkoppling ske automatiskt varför det i bästa fall enbart blir en kort blink hos kunderna. Att markkabelsystemen drivs radiellt beror delvis på behovet att hålla nere felströmmar eftersom markkabel har betydligt lägre impedans (elektriskt motstånd) än luftledningar. Men om kabelsystemet skulle drivas maskat finns även risk för överbelastning vid normal drift, eftersom elledningar med lägst impedans tar på sig mest ström. En markkabel som varit överbelastad kan, till skillnad från luftledning, få permanenta skador. Den totala sträckan elledningar blir i de flesta fall längre om ett radiellt kabelsystem byggs.

Att kablifiera delsträckor ute i ett befintligt maskat luftledningssystem innebär helt andra påfrestningar på markkabel och kabelskarvar. Luftledningar utsätts regelbundet för störningar på grund av åska men är mycket tåliga för de överspanningar och strömmar som uppstår. Eftersom elsystemet är maskat så kommer alla elledningar att utsättas för mer eller mindre höga strömmar och spänningar, vilket kommer att öka risken för markkabelfel markant om man kablifierar delsträckor. Om aktuell 145 kV-ledning Ygne-Hemse skulle markförläggas innebär det att cirka 40 km markförlagd ledning skulle byggas in i det omgivande maskade luftledningssystemet.

Moderna markkabel har idag enligt tillverkarna en hög tillgänglighet om man ser till själva kabeln. Det är ofta skarvar som är problemet. Antalet skarvar beror på längden och storleken på kabeltrummor (för 145 kV 1-fas markkabel beroende på area normalt cirka 500 – 800 meter/trumma). Vid längre markkabel krävs kompensation för den reaktiva effekt markkablarna genererar (se avsnitt 1.5.2 *Effektflöden och dimensionering*). Ju fler komponenter som byggs in i ett elnät, desto fler potentiella felkällor finns det. Varje skarv och varje station som byggs blir en ny potentiell felkälla. Därmed försämras driftsäkerheten totalt sett ju fler markkabel som kommer in i systemet. Av detta följer även att driftsäkerheten på en markförlagd ledning försämras ju längre den är eftersom antalet skarvar ökar. En markförläggning av aktuell ledning kräver cirka

300 kabelskarvar om trummor med 800 meter kabellängder kan användas (50 skarvar per enledarkabel samt dubbla kabelförband med tre enledarkablar vardera).

1.4.2 Felstatistik

De europeiska stamnätsoperatörernas samarbetsorgan, Entso-e, publicerar statistik över avbrott och fel på komponenter och luftledningar/markkablar. Denna statistik sträcker sig för Sveriges del ned till och med 130 kV och bygger på uppgifter från de större regionnätsföretagen. Det normala är att man anger det senaste årets utfall samt medelvärden för längre perioder (10 år) bakåt. Underlaget för uppgifterna nedan baseras på 2018 års utgåva och avser statistik för svenska 130 kV ledningar under perioden 2008-2017 (Entso-e 2018).

De övergående felen på grund av åska i luftledningsnät är vanliga på de högsta spänningsnivåerna, för 130 kV luftledningar ungefär 0,8 fel/100 km och år. Ett kortvarigt bortfall av en elledning innebär att effekten fördelas över på andra ledningar. Skulle felet vara kvarstående, för 130 kV cirka 0,06 fel/100 km och år, kan man räkna med att ledningen är åter i drift inom 24 timmar. När det gäller markkablar stiger felintensiteten med spänningen eftersom majoriteten av felen är kopplade till isolationen, förutom yttre påverkan såsom avgrävning. I statistiken anges för 130 kV markkablar totalt 1,6 fel/100 km och år varav 1,0 fel/100 km och år är kvarstående. Detta är inte det samma som att 0,6 fel/100 km och år är övergående på samma sätt som för luftledningar där man för det mesta har automatisk återinkoppling: För markkabel görs alltid en undersökning/bedömning innan man vågar spänningssätta efter att den fränkopplats automatiskt. Sammanfattningsvis kan konstateras att en markkabel på 130 kV-nivå har cirka 15 gånger sämre tillförlitlighet än en 130 kV luftledning.

Då ett fel uppstår på en markkabel är reparationstiden avsevärt längre jämfört med den begränsade mängd luftledningsfel som kräver reparation. När ett kabelfel har lokaliserats måste dessutom kabeln friläggas innan reparationen kan påbörjas. Reparationsarbetet är betydligt mer tekniskt komplicerat och tidskrävande jämfört med reparation av en luftledning, som normalt går snabbare än 24 timmar. Skarvning av 130 kV kablar är ett avancerat hantverk som måste utföras i fält i en fuktfri miljö. När kabeln har frilagts måste därför ett tält etableras kring skarvplatsen varpå skarvningen genomförs av specialutbildad personal. Skarvning av 130 kV-kablar går därför inte att jämföra med skarvning av lokalnätskablar där färdiga skarvhylsor kan användas. Den typiska tiden för att återställa en markkabel i normal drift är 2-7 dagar men vid svåra väderförhållanden kan det ta betydligt längre tid än så.

Markkabellens 15 gånger sämre tillförlitlighet (sannolikhet för fel) jämfört med luftledning tillsammans med markkabellens flera gånger längre reparationstid medför att sannolikheten för att en luftledning är tillgänglig (i drift) är i storleksordningen 50-100 gånger större. Den betydligt lägre tillgängligheten för en markkabel innebär att man inte kan bortse från att ytterligare ett fel inträffar under den tiden kabeln repareras. I rena markkabellsystem är därför praxis hos de allra flesta nätföretag att man dimensionerar elsystemet enligt N-2 kriteriet.

Som redan konstaterats är huvuddelen av luftledningsfelen övergående. Skulle felet vara kvarstående kan man räkna med att ledningen är åter i drift inom 24 timmar och sannolikheten för att ett nytt kvarstående fel uppstår under denna tid kan anses försumbar. Därför dimensioneras luftledningsnäten enligt N-1 kriteriet.

1.5 Tekniska förutsättningar

Växelström är det effektivaste sättet att överföra el och är idag en etablerad internationell standard. Ju högre spänningsnivå som används för överföring av el desto lägre blir förlusterna. En hög spänningsnivå är alltså både effektiv och miljövänlig. Med hög spänning kan större mängder el transporteras på ledningen, samtidigt som överföringsförlusterna procentuellt blir lägre. Används lägre spänning behövs fler ledningar för att uppnå samma kapacitet.

1.5.1 Felströmmar

Med ett säkert elnät avses både person- och driftsäkerhet. När det gäller direktjordade elsystem (i Sverige från och med 130 kV och högre) är ledningsägaren skyldig att skydda omgivningen från de spänningssättningar som sker vid jordfel. Elsäkerhetsverkets föreskrifter ställer krav på hur hög spänningssättning man får ha i jordtag (Elsäk FS2015:3). Till följd av markkablarnas lägre impedans (elektriska motstånd) blir felströmmarna höga i nät med mycket kabel. Höga felströmmar är mycket svåra att hantera: de kräver dyr utrustning i stationerna och när de blir extremt höga, att elnätet byggs om. Ombyggnaden sker då i regel på ett sätt som innebär att ännu fler ledningar behöver byggas.

Komponenter som ingår i elnätet dimensioneras för att tåla en viss jordfelsström. För man in markkabel i en del av elnätet kan ett större område påverkas. Det är alltså inte bara komponenter i närliggande stationer som berörs, utan både ledningar och stationer längre bort kan påverkas. Beroende på omfattningen kan detta leda till betydande kostnader. I elnät där markkabel införs ökar jordfelsströmmarna, i synnerhet om näten maskas. På grund av de höga felströmmarna kan nätägaren för det mesta inte driva rena markkabelsystem maskade. De drivs istället radiellt, ofta med automatisk omkoppling vid fel. Till viss del kan åtgärder mot höga jordfelsströmmar göras i stationerna, men i slutändan måste utrustning bytas ut till en högre dimensioneringsklass.

Kostnaderna för dessa åtgärder kan bli betydande och är direkt kopplade till jordfelsströmmens storlek. Vid de felströmmar som skulle uppstå vid 100% markkabel och maskat nät i till exempel storstadsområden blir det svårt att överhuvudtaget få fram kabel och utrustning som klarar felströmsnivåerna. Om VFED enbart skulle använda markkabel när nya ledningar byggs eller gamla förnyas, skulle extremt höga felströmsnivåer nås mycket snabbt i hela nätet. Detta gäller även utanför storstäderna.

I ett luftledningssystem dämpas storleken på felströmmen kraftigt och är som högst i matande stationer för att sjunka till runt en 1/10 långt ut i elnätet. Ersätts en luftledning ute i det maskade elnätet med markkabel så blir dämpningen betydligt sämre, speciellt för jordfelsströmmar. En typisk åtgärd för att klara föreskrifterna är att installera så kallade isolertransformatorer i mellanspänningsnäten. Idag sker detta i huvudsak i närheten av stamnätstationer. Även stationerna har krav på sig utifrån de jordfelsströmmar som kan uppstå, så kallad spänningssättande ström. Här finns en personsäkerhetsaspekt: vid för höga spänningssättande jordfelsströmmar kan personer, husdjur och egendom utsättas för fara. Eftersom näten förändras över tid behöver nätägaren ha löpande kontroll på spänningssättande jordfelsströmmar. Det är dock oerhört komplext att följa upp och utvärdera spänningssättande jordfelsströmmar i takt med att elnätet förändras. Därför behöver nätägare generellt hålla nere felströmmarna vilket bäst görs genom att minimera mängden markkabel i 130 kV nätet.

1.5.2 Effektflöden och dimensionering

Den lägre impedansen hos markkablar innebär också en snedfördelning av effektflödena mellan olika ledningar i elnätet eftersom den elledning som har lägre impedans drar på sig mer effekt (minsta motståndets lag). Strömmen går den vägen där det är lättast att komma fram. När enstaka elledningar bestående av markkabel förs in i ett elnät som i huvudsak består av luftledningar, innebär det i regel att kabeln drar på sig mest effekt. Den blir då ofta dimensionerande för kapaciteten i området den matar. Vid fel på en elledning ska dess effekt omfördelas till de andra ledningarna i elnätet. Vid fel på markkabeln kan omkringliggande luftledningar bli överlastade och vid fel på någon av luftledningarna kan kabeln överlastas. Ofta behöver man bygga flera elledningar för att kunna hantera omfördelning av flöden vid införande av markkabelledningar i maskade luftledningsnät.

Mängden ström eller effekt som kan överföras på en luftledning beror av hur varm ledningen blir. Ju mer effekt som överförs på ledningen desto större blir värmeutvecklingen. Ledaren värms upp och när metallen

blir varm utvidgas den vilket gör att ledaren blir längre och ledningen, som måste hänga på ett visst avstånd över mark, hänger längre och längre ner ju varmare den blir. I princip är det minsta tillåtna avstånd över mark som bestämmer hur mycket effekt som kan överföras på en luftledning.

En kabel ligger i mark eller i rör. Värmeavledningen sker då inte till luft utan till marken runt omkring. Kabeln värms därmed upp snabbare och den kan inte heller tillåtas att utvidgas lika mycket som en luftledning eftersom ledaren ligger fixerad omgiven av plast och armering. I praktiken kan en kabel inte belastas lika mycket som en luftledning utan det krävs då en mycket tjockare kabel och/eller fler kablar för att klara samma effektöverföring som en luftledning. De högsta effektflödena i nätet sker normalt under årets kallaste dagar. En luftledning klarar då att överlastas betydligt mer än en markkabel eftersom värmeutvidgningen i luftledningen minskar väsentligt på grund av den ökade avkyllningen. Markkablar måste däremot ligga på frostfritt djup vilket gör att de inte får någon ökad avkyllning vid höga effektflöden under årets kallaste dagar. Skillnader i temperatur och möjligheter till avkyllning mellan de båda teknikerna är orsaken till att en markkabel kräver en grövre dimensionering jämfört med en luftledning.

Markkablar på högre spänningsnivåer som 130 kV producerar en ansevärd mängd så kallad reaktiv effekt. Orsaken är att det snabbt uppstår stora fasförskjutningar mellan ström och spänning längs ledningssträckan. Det innebär att stora mängder av den el som matas in inte kan användas redan efter korta sträckor. För att korrigera fasförskjutningen måste man kompensera med shuntreaktorer, som är förhållandevis dyra. Normalt går dessa att placera i ledningens anslutande stationer, som dock kan behöva bestyckas med extra ledningsfack. Reaktorerna är komponenter som måste byggas in i nätet när 130 kV-ledningar markförläggs. Därmed tillförs ytterligare felkällor som kan minska driftsäkerheten.

1.5.3 Elkvalitetsproblem

Ju fler markkablar som finns i systemet desto större blir risken för elkvalitetsproblem i form av elektriska resonansfenomen och transienta överspänningar. Alla system har egenfrekvenser kring vilket det kan uppstå svängningar. Typiskt är till exempel broar som kan börja svänga mekaniskt. Ett klassiskt exempel är Tacoma Narrows Bridge i USA som kollapsade den 7 november 1940, fyra månader efter invigningen, till följd av ett resonansfenomen kopplat till bronns egenfrekvens. Elsystemets egenfrekvens orsakas av elnätets ingående kapacitanser och induktanser som orsakar en elektrisk svängningskrets. Kablar har större kapacitans än luftledningar vilket introducerar nya resonansfrekvenser i nätet. Det förskjuter dessutom befintliga resonansfrekvenser neråt och ökar risken för förstärkning av befintliga resonansfrekvenser. Ju fler markkablar som införs desto närmare kommer man elnätets egenfrekvens med risk för att det uppstår stora oscillationer i spänning och ström. Fenomenen kan orsaka höga spänningar och uppvärmning som kan skada utrustning i elnätet såsom exempelvis transformatorer och markkabelskarvar. Även kunders anläggningar och apparater kan skadas.

Resonansen triggas alltid av något. I bronns fall var det kraftig blåst som gjorde att bron kom i självsvängning. I elsystemets fall är det ofta ett fel någonstans i nätet, exempelvis ett fel på en ledning eller en komponent, som drar igång resonansen. Det är väldigt komplext och utmanande att bedöma riskerna för när resonanser kan uppstå och inte. Det krävs avancerade modeller av hela elsystemet och inte ens med dessa är det lätt att förutse fenomenet. Dessutom ändras risken så fort något i systemet ändras. Så fort det är ett avbrott någonstans, en ny ledning byggs och så vidare så påverkas resonansfrekvenserna. Det gör att det är svårt att åtgärda problemet. Normalt sätter man in så kallade filter som anpassas för att ta bort oönskade resonansfrekvenser. Men om dessa inte är exakt anpassade till hur nätet ser ut just då fungerar de inte och kan till och med förvärra situationen. Resonansproblemet är mer utmanande för högre än för lägre spänningsnivåer. Det yttrar sig konkret i att det antal kilometer markkabel som kan installeras innan en påtaglig risk uppstår är mindre för höga systemspänningar än för låga.

Transienter i spänning och ström är också ett elkvalitetsproblem för vilket risken ökar med en ökad andel markkabel i nätet. En transient är en väldigt kort men väldigt hög ”spik”, det vill säga en skadlig spännings- eller strömtopp, som kan slå sönder apparater och kabelskarvar. Transformatorer är stora apparater som kan gå sönder till följd av transienter och de tar lång tid att ersätta.

Studier av effekterna av omfattande markförläggning av kraftledningar på elkvalitet har bland annat gjorts i Danmark där ett politiskt beslut togs i Folketinget 2008 om en handlingsplan som syftade till kablifiering av stora delar av kraftsystemet. Erfarenheter från Danmark visar att även relativt korta kablar kan ha negativ påverkan på elkvaliteten i ett stort geografiskt område. Det har konstaterats att kablifiering av stora delar av transmissionsnätet kan innebära en betydande risk för både befintliga och nya anläggningar i Danmark och att en stor mängd kabel i ett visst område begränsar mängden kabel som kan anslutas på andra platser i systemet (Lennerhag 2020). Den danska kabelhandlingsplanen reviderades genom ett ändringsbeslut 2016 som innebar att omfattningen av den planerade markförläggningen av ledningsnätet reducerades väsentligt.

Sammanfattningsvis beror elkvalitetsproblematiken på att markkablares elektriska egenskaper är sådana att de kan bidra till skadliga spänningshöjningar i elnätet med potentiella driftstörningar som följd. För att minska risken för sådana driftstörningar måste nätföretagen hålla sig på ett säkert avstånd till riskområdet för denna typ av störningar. Det gör man genom att begränsa mängden markkablar på höga spänningsnivåer i systemet.

1.5.4 Likströmsteknik (DC, HVDC)

Ibland nämns likströmstekniken (DC) som en lösning för att undvika byggnation av luftledningar. Växelströmstekniken (AC) är dominerande inom elförsörjningen och i hela världen produceras, överförs och mottas elektricitet som växelström. Likströmstekniken har egenskaper som gör den användbar för att överföra el på långa avstånd, från en punkt till en annan. Den har också fördelen att den kan markförläggas, utan de tekniska begränsningar som växelström har. I dag används likström i förbindelser där syftet är att överföra el på långa avstånd mellan två punkter i ett kraftsystem, för att knyta ihop olika kraftsystem (till exempel två växelströmssystem som inte är synkrona med varandra) samt att möjliggöra överföring i sjökablar på längre avstånd. Det gör att tekniken främst används i förbindelser mellan länder och för att ansluta vindkraft långt ut till havs.

Att föra in en aktiv DC-komponent som behöver styras i ett självreglerande AC-system är komplext ur driftsynpunkt och kan leda till negativa konsekvenser för driftsäkerheten. För kortare sträckor på 130 kV-nivå är det dessutom inte ekonomiskt försvarbart att bygga likström. Bara omriktarstationerna som krävs i varje ände av ledningen för omvandling av växelström till likström kostar i storleksordningen flera hundra miljoner kronor.

Förlusterna är relativt höga, i storleksordningen 1-2 %. Därtill kommer att flexibiliteten minskar. Det är i praktiken inte försvarbart att bryta upp en likströmsledning för att ansluta något på vägen. DC-projekt går inte att motivera ekonomiskt om det finns en AC-lösning. DC kommer sannolikt aldrig att kunna konkurrera med AC om AC är tekniskt genomförbart.

Sammanfattningsvis är det ur teknisk synvinkel olämpligt att bygga större markkabelsystem på högre spänningsnivåer, speciellt om de maskas. Enstaka markförlagda kablar kan accepteras men tekniken bör användas restriktivt, så att man verkligen ”spar” den möjligheten till de ställen där det är helt omöjligt fysiskt att komma fram med luftledning, exempelvis i tätbebyggd stadsmiljö.

1.6 Ekonomi

1.6.1 Förutsättningar för aktuell ledning

Luftledning är generellt sett ett betydligt mer kostnadseffektivt alternativ jämfört med markkabel. Kostnaden för aktuell ledning i utförande som luftledning är 5,3 Mkr per kilometer och 115 Mkr totalt medan kostnaden för markkabel är 9,2 Mkr per kilometer och 443 Mkr totalt, se bilaga sist i dokumentet. Markkabel mellan Ygne och Hemse skulle således kosta nästa fyra gånger så mycket som luftledning.

Merkostnaden för markkabel generellt innebär högre nättariffer för kunder anslutna till regionnätet, vilket leder till högre elnätspriser för slutkunderna. Byggnation av markkabel istället för luftledning medför även att färre nätinvesteringar kan ske under samma tidsperiod då nätföretagen har en ram för investeringar. Därmed bromsas den ökade elektrifieringen av industri och samhällsviktiga funktioner vilket är en viktig del i hela energiomställningen.

Den väsentligt högre kostnaden för markkabel jämfört med luftledning är relaterad till ökad material- och energiåtgång. Den mängd aluminium som skulle krävas för att överföra samma effekt i markkabel som luftledning mellan Ygne och Hemse är nästan tre gånger så stor för markkabel jämfört med luftledning, 836 ton jämfört med 302 ton. VFED/GEAB strävar efter att minimera resursanvändning och energiförbrukning i samband med nyinvesteringar i elnätet. Markförläggning av regionnätets ledningar utanför tätortsmiljö är inte förenlig med denna strävan.

1.6.2 Förutsättningar generellt

Som redan nämnts är andelen markkabel i VFED:s 130 kV-nät låg, totalt endast 1,8% av sträckan. Majoriteten av dessa kabelsträckningar har sitt ursprung i flyttprojekt där kund eller annan intressent (till exempel kommuner) har bekostat markkabel för att komma åt marken till andra ändamål, samt nyanslutningar där den anslutande kunden bekostat kabel. Resterande andel av markkablarna består främst av sjökablar och kablar i storstadsmiljöer, alltså områden där luftledning inte varit ett genomförbart alternativ.

Det förekommer att tredje part kommer med önskemål om att kablifiera befintliga eller nya luftledningar. På 130 kV-nivå är förordat alternativ av ovan nämnda skäl alltid luftledning för nya ledningar. För befintliga ledningar är förordat alternativ alltid fortsatt luftledning. Dock behöver en bedömning göras från fall till fall om detta är rimligt. Grunden för bedömningen är att kundkollektivet som helhet inte ska drabbas av någon försämring avseende effektivitet, tillförlitlighet, personsäkerhet och driftsäkerhet. I bedömningen ska också investeringens prioritering gentemot andra investeringar ingå.

Det kan även förekomma att man kablifierar för att man inte kan invänta tillstånd för en luftledning. Det har skett i Sverige vid vindkraftsprojekt vars möjlighet till bidrag byggts på att anläggningen måste vara i drift före ett visst datum. Projektet har då betalat kostnaden.

Ett annat exempel på kablifiering av luftledningar är exemplet Stockholms Ström där man via kablifiering kan frilägga värdefull mark. Detta har alltså skett på kommersiella villkor och enligt de tekniska krav som föreligger avseende redundans.

De ovan beskrivna exemplen, där markförläggning av 130 kV-ledningar har accepterats då dessa finansierats av extern part, har genomförts eller initierats för ett antal år sedan. Kunskapen om de tekniska utmaningarna med en ökande andel kabel i 130 kV-nätet har utvecklats successivt. En ökad restriktivitet gällande markförläggning av 130 kV-ledningar är en följd av denna kunskapsutveckling.

I linje med VFED:s/GEAB:s aktuella ställningstagande kommer bolaget framledes inte förorda markförläggning av befintliga luftledningar, eller att nya ledningar byggs som markkabel, om fysiskt utrymme finns

för luftledning. Detta gäller oavsett om det aktuella ledningsprojektet finansieras av extern part eller av kundkollektivet via nättarifferna.

1.7 Opinion och intrång

1.7.1 Opinion och likabehandling

Den helt dominerande uppfattningen hos de markägare, närboende samt övriga intressenter som berörs av en planerad ny elledning är att den ska markförläggas. Att det är en allmän uppfattning hos de närmast berörda är fullt förståeligt då luftledningen medför en visuell påverkan samt även ett visst hinder i markanvändning till följd av stolpar och ledningsgata. Även en markförlagd ledning medför ett hinder i markanvändning men det berör ett mindre område och framför allt är den visuella påverkan mindre. En markförläggning av en regionnätledning medför en mindre påverkan på de närmast berörda, på bekostnad av samhället i övrigt som får ta konsekvenserna av ökade risker i elnätet, lägre driftsäkerhet samt den högre kostnaden som markförläggning av regionnätledningar medför.

Eftersom VFED/GEAB verkar inom en reglerad monopolverksamhet har bolaget ett samhällsansvar vad gäller agerandet gentemot de markägare och övriga intressenter som berörs av bolagets elledningar. Av det följer att samma principer måste tillämpas över hela landet för teknikvalet luftledning/markkabel inom vissa typer av miljöer. Om VFED/GEAB väljer att bygga en 130 kV markkabel istället för en dito luftledning i en viss miljö måste de ekonomiska och tekniska konsekvenserna beaktas av att markkabel alltid väljs i den typen av miljö. VFED/GEAB måste alltid tillämpa denna helhetssyn på teknikvalet i tillståndsprocessen för nya elledningar eftersom prejudikat kring teknikvalet i olika miljöer successivt bildas i samband med domstolsprövning av Energimarknadsinspektionens koncessionsbeslut. Ur ett likabehandlingsperspektiv anser VFED/GEAB att det inte är rimligt att markförlägga vissa regionnätledningar i sådana miljöer där fysiskt utrymme finns för luftledning.

Om VFED/GEAB exempelvis väljer att markförlägga den aktuella kraftledningen Ygne-Hemse för att tillgodose krav från omvärlden att minimera påverkan på landskapsbild, jord- och skogsbruk måste konsekvenserna beaktas för bolagets hela elnät och hela kundkollektiv av att alltid markförlägga 130 kV regionnätledningar i liknande miljöer, det vill säga i skog- och jordbrukslandskap där få eller inga bostäder finns nära ledningen. Eftersom den lokala opinionen i princip alltid kräver markförläggning av nya 130 kV-ledningar måste en policy tillämpas för när detta kan accepteras. Det går inte att här endast se till varje kraftledningsprojekt var för sig, utan konsekvenserna av markförläggning måste betraktas ur ett systemperspektiv, då varje ny kabelsträckning i det maskade 130 kV-nätet medför konsekvenser för kringliggande elnät. Att tillämpa en policy, som innebär att nya 130 kV-ledningar byggs som markkabel i miljöer liknande den på sträckan Ygne-Hemse, skulle medföra en omfattande markförläggning av regionnätledningar i hela landet. Det skulle leda till att alla VFED:s/GEAB:s nätkunder skulle få bekosta åtgärder som ger sämre leverenskvalitet för alla och i förlängningen ett system som kanske inte ens går att driva på ett säkert sätt.

Som nämnts i avsnitt 1.3 ovan ansvarar VFED/GEAB enligt 3 kap. 1 § ellagen för att bolagets elnät är säkert, tillförlitligt och effektivt. Enligt vad som här redovisats uppfyller en lösning med markförlagd kabel inte de kriterierna. För att minimera andelen kabel i 130 kV-nätet har VFED/GEAB därför tagit ett principbeslut (se avsnitt 1.2) om att alltid förordna luftledning i första hand och att markförlagd 130 kV-ledning endast accepteras på kortast möjliga sträckor där fysiskt utrymme för luftledning saknas.

1.7.2 Markintrång och miljöpåverkan

Vid markförläggning av regionnätkablar krävs stora schakt längs hela ledningssträckningen. Vid passage av hållmarker fordras sprängning som medför en permanent och irreversibel miljöpåverkan. Den omfattande

schaktningen innebär större risk för påverkan på kulturhistoriska lämningar och skyddsvärda arter och naturmiljöer. Schaktning i mossar och kärr innebär körning på mark med dålig bärighet och påverkan på hydrologin. För en luftledning behövs endast schaktning på enstaka platser, vid stolpplaceringar. Dessa placeringar kan i viss mån anpassas efter markförhållanden för att minimera påverkan på marken. En luftledning medför därför ingen permanent miljöpåverkan utan när ledningen raseras försvinner spåren av den. I öppen åkermark sker detta direkt när ledningen raserats medan det sker successivt i skogsmark vartefter skogen återetableras.

Med avseende på åtkomst för reparation är det generellt olämpligt att förlägga markkabel i vägar. Alternativt behöver det finnas stora utrymmen där markkablar kan dras ut och skarvas. Likaså kommer markkabelförläggning i närhet av vägar att medföra avstängningar och trafikstörningar vid byggnation, underhåll och reparation.

Utökning av överföringsförmåga för att möta framtida kapacitetsbehov, kan uppnås på flera olika vis på en luftledning. Det vanligaste är att byta ut faslinorna till linor med grövre ledningsarea, något som generellt kan göras utan större ingrepp i naturen. För att utöka överföringsförmågan på en markkabel krävs att en ny markkabel förläggs med grövre ledningsarea. Då krävs alltså ett ansevärt schaktarbete längs hela markkabelsträckan alternativt att ytterligare en markförlagd ledning grävs ned i en ny sträckning

En luftledning kräver en väsentligt bredare skogsgata, 32 meter för aktuell ledning, jämfört med en markförlagd ledning som kräver ett cirka 15-20 meter brett avverkat arbetsområde vid förläggning och en cirka 7 meter bred skogsgata under driftskedet. Den breda skogsgatan tillsammans med luftledningens stolpar och linor gör att en luftledning medför en visuell påverkan på landskapsbilden som undviks vid markförläggning av kabel. I det senare fallet begränsas påverkan till skogsgatan i byggskedet samt till den smala skogsgatan under drift. I ett öppet landskap är en luftledning mer synlig samtidigt som de fysiska ingreppen i miljön begränsas till stolpplaceringarna.

Luftledningens skogsgata kan medföra positiva konsekvenser för naturmiljön och den biologiska mångfalden. Gamla tiders ängs- och hagmarker har minskat dramatiskt i Sverige under de senaste 100 åren. Skötseln av ledningsgatorna påminner om bete och slåtter och på så vis har arter som trivs i det öppna landskapet bevarats. Att ledningsgator, liksom vägrenar, flygplatser och golfbanor främjar den biologiska mångfalden har börjat uppmärksammas på senare tid. Dessa gräsmarker har visat sig vara viktiga gröna länkar i landskapet som binder ihop gräsmarksmiljöer. Bland de arter som trivs i ledningsgatorna finns flera relativt ovanliga växter, men även olika fjärilar och insekter trivs. Ledningsgator inom skogsmark bidrar även till bra betesytor för vilt då sly växer upp efter den återkommande röjningen.

REFERENSER

Affärsverket svenska kraftnät, Vattenfall Eldistribution AB, E.ON Energidistribution AB, Ellevio AB, Skellefteå Kraft Elnät AB och Jämtkraft AB. 2021. *Förslag till åtgärder för att säkerställa utbyggnaden av elnätet*. Skrivelse till Regeringen 2021-01-29.

Energiföretagen. 2021. *Regionnätets funktion och utformning*. <https://www.energiforetagen.se/globalassets/energiforetagen/det-erbjuder-vi/publikationer/webshop-regionnätets-funktion-och-utformning.pdf>

European Network of Transmission System Operators for Electricity (Entso-e). 2018. *Nordic and Baltic Grid Disturbance Statistics 2017 – Regional Group Nordic*.

Lennerhag, O. 2020. *Konsekvenser av kablifiering i stamnätet – elkvalitet, temporära överspänningar och interaktion*. Independent Insulation Group Sweden AB. Rapport R20-1218-01.

BILAGA

Kostnadsberäkning för luftledning respektive markkabel mellan Ygne och Hemse.

2023-03-28

2023-101910-0001

Kalkylerna är framräknade med hjälp av Energiföretagens kalkylverktyg EBR Ekonomi – Regionnät, samt erfarenhetsbaserade siffror från Vattenfall Eldistribution.

	EBR Kod	Kostnad km	km	Kostnad år	Totalkostnad
Huvudalternativ luftledning					
145 kV Luftledning (km) 910 mm ² OB Parstolpe (Ombyggnation)	G5008	1 957 000	35		68 495 000
145 kV Luftledning (km) 910 mm ² NB Parstolpe (Nybyggnation)	G5004	2396000	5		11 980 000
Rasering 145 kV Luftledning	8012	113 000	5		565 000
Destruktion av raserad kreosotstolpe (500 stycken)	8211				147 805
145 kV Topplina (km) 1x142 mm ²	G5024	311 000	40		12 440 000
Tillägg utökat intrång breddning 4 m	13114	24 500	27		661 500
Tillägg kompositstolpar (uppskattas till 20%)		391 400	40		15 656 000
Tillägg opto i topplina (del av EBR-kod)	12411	70 000	40		2 800 000
Drift- och underhåll (DoU)*		1 400		56 000	2 240 000
		5 264 300			114 985 305
Alternativ luftledning					
145 kV Luftledning (km) 910 mm ² NB Parstolpe (Nybyggnation)	G5004	2 396 000	43		103028000
Rasering 145 kV Luftledning	8012	113 000	40		4 520 000
Destruktion av raserad kreosotstolpe (500 stycken)	8211				147 805
145 kV Topplina (km) 1x142 mm ²	G5024	311 000	43		13 373 000
Tillägg opto i topplina (del av EBR-kod)	12411	70 000	43		3 010 000
Tillägg kompositstolpar		391 400	43		16 830 200
Drift- och underhåll (DoU)*		1 400		60 200	2 408 000
		3 282 800			143 317 005
Markkabel alternativ**					
145 kV JK (km) i landsbygd 3x1x1200	G3066 x 2	9 140 000	46		420440000
Rasering 145 kV Luftledning	8012	113 000	40		4 520 000
Destruktion av raserad kreosotstolpe (500 stycken)	8211				147 805
Opto för intern kommunikation	14811	225 600	46		10 377 600
Uppskattat tillägg svår mark		400 000	46		18 400 000
Reduktion vid 2 JK i schakt i landsbygd (km)	G3089	-710 000	46		-32 660 000
Drift- och underhåll (DoU)*		800		36 800	1 472 000
Kompensering av lçj 145 kV			1		20 000 000
		9 169 400			442 697 405
* DOU-kostnader är framtagna från Vattenfalls modell					
Tabell 25 – Generella drift- och underhållskostnader för ledningar					
Ledningar	DoU kostnad i kkr per km och år				
Typ	130 kV	70 kV	40 kV		
Friledning, per ledningsgata	3,0	3,0	3,0		
Friledning trästolpar, per ledning	2,8	2,3	1,4		
Friledning övriga stolpar, per ledning	1,4	1,2	0,7		
Kabel (kabelstråk)	0,8	0,8	0,8		
Källa: DoU kostnaderna för friledning baseras på sammanvägda kostnader utifrån underlag för Eldistributions regionnät. Då underlaget för kablar är litet har värdet ovan antagits och avser adm kostnader, kabelvisning/bevakning, drift etc.					
Kostnaden för friledning har delats upp i två delar, en del avseende ledningsgatan och del avseende själva ledningen. Den totala DoU-kostnaden för en ledning är alltså summan av kostnaden för ledningsgatan samt kostnaden för ledningen med aktuell stolptyp. För dubbelledningar antas att den totala DoU kostnaden är summan av kostnaden för en ledningsgata och två ledningar.					
**Markkabel anses inte vara ett reellt alternativ för aktuell ledning och en sträckning för ett kabelalternativ har inte utretts. Sträckningen uppskattas till 15% längre än huvudalternativet.					