



# CHALMERS

## Chalmers Publication Library

### **Strategi för termisk dimensionering av markförlagd högspänningskabe Förslag till utvecklade dimensioneringsprinciper Slutrapportl**

This document has been downloaded from Chalmers Publication Library (CPL). It is the author's version of a work that was accepted for publication in:

Citation for the published paper:

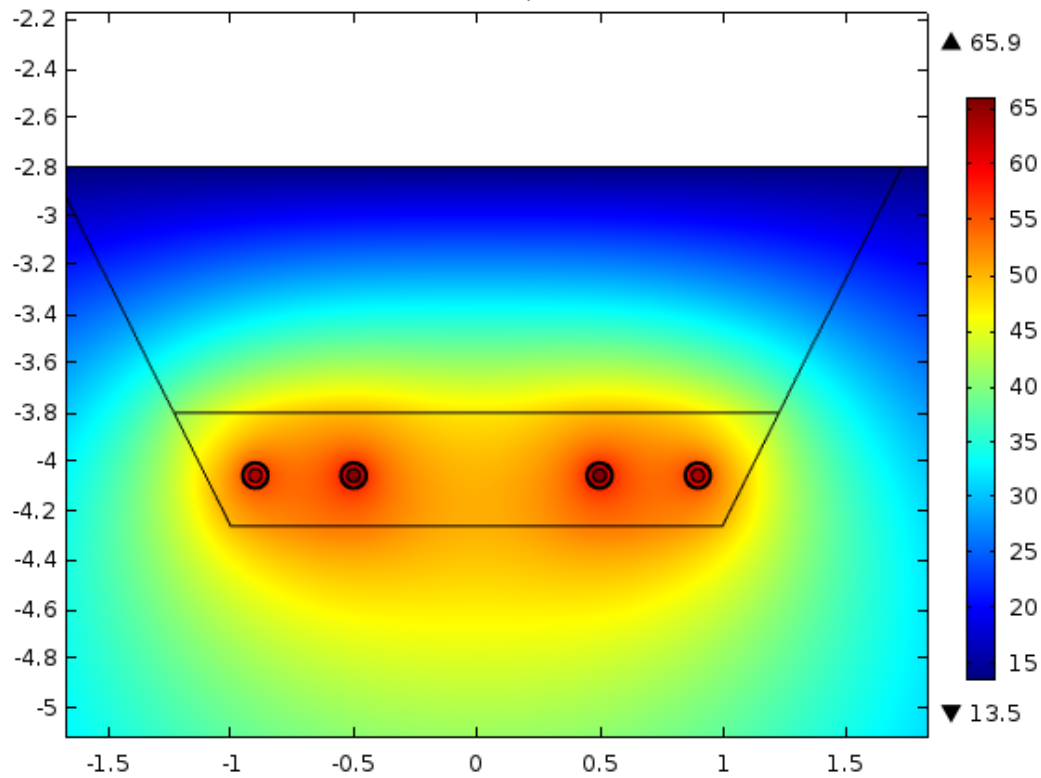
Sundberg, J. (2016) "Strategi för termisk dimensionering av markförlagd högspänningskabe Förslag till utvecklade dimensioneringsprinciper Slutrapportl".

Downloaded from: <http://publications.lib.chalmers.se/publication/238095>

Notice: Changes introduced as a result of publishing processes such as copy-editing and formatting may not be reflected in this document. For a definitive version of this work, please refer to the published source. Please note that access to the published version might require a subscription.

Chalmers Publication Library (CPL) offers the possibility of retrieving research publications produced at Chalmers University of Technology. It covers all types of publications: articles, dissertations, licentiate theses, masters theses, conference papers, reports etc. Since 2006 it is the official tool for Chalmers official publication statistics. To ensure that Chalmers research results are disseminated as widely as possible, an Open Access Policy has been adopted. The CPL service is administrated and maintained by Chalmers Library.

(article starts on next page)



# Strategi för termisk dimensionering av markförlagd högspänningskabel

Förslag till utvecklade dimensioneringsprinciper

Slutrapport

Jan Sundberg



Strategi för termisk dimensionering av markförlagd högspänningskabel  
Förslag till utvecklade dimensioneringsprinciper  
Slutrapport

Strategy for thermal design of buried high-voltage cable  
Proposals for developed design principals  
Final report

Jan Sundberg

© Jan Sundberg

Rapport / Institutionen för bygg och miljöteknik, Chalmers tekniska högskola, 2016  
Rapport 2016:8  
ISSN 1652-9162

Department of Civil and Environmental Engineering  
Division of GeoEngineering  
Chalmers University of Technology  
SE-412 96 Göteborg  
Sweden  
Telephone: + 46 (0)31-772 1000



## Förord

Föreliggande strategirapport utgör slutrapport för en utvecklingsatsning från Svenska Kraftnät tillsammans med Chalmers (Bygg & Miljö, Avdelningen för Geologi och geoteknik). Totalt utgörs rapporteringen av fem rapporter, varav ett examensarbete. Arbetet har drivits av Peter Lidén och Jan Sundberg, där den sistnämnde varit Chalmers projektledare. I arbetet har också medverkat examensarbetarna Andreas Lilliestierna och John Utas, den förstnämnde har även utfört omfattande modelleringsarbete, samt Nathali Cuotto, sistaårs teknolog. Delar av utvecklingsarbetet planeras också vara en del av Peter Lidéns doktorsarbete.

Utvecklingsarbetet har följts av en referensgrupp. Denna har bestått av Valentinas Dubickas, Gunnar Gehlin och Erik Thunberg, Svenska kraftnät, samt Håkan Garin, Geoverkstan och slutligen Professor Lars O. Ericsson från Chalmers. Referensgruppen har bidragit med många givande kommentarer och aktivt medverkat till arbetets utveckling. Svenska kraftnäts projektledning har inledningsvis utgjorts av Erik Thunberg och därefter av Valentinas Dubickas.



# Innehållsförteckning

|  |    |
|--|----|
| Förord.....  | 5  |
| Innehållsförteckning.....  | 7  |
| Sammanfattning.....  | 9  |
| Summary .....  | 12 |
| 1 Bakgrund och syfte.....  | 15 |
| 1.1 Introduktion - Längdskalan för omgivningens termiska påverkan..... | 15 |
| 1.2 Erfarenheter från Sydvästlänken.....                               | 16 |
| 1.3 Syfte.....   | 17 |
| 1.4 Hela arbetets omfattning.....                                      | 17 |
| 2 Kabelns temperatur .....   | 19 |
| 2.1 Vad påverkar kabelns temperatur?.....                              | 19 |
| 2.2 Hur påverkas kabelns temperatur?.....                              | 20 |
| 2.2.1 Hög termisk resistivitet i omgivande mark.....                   | 20 |
| 2.2.2 Tidsskala .....  | 22 |
| 2.2.3 Ursprunglig marktemperatur .....                                 | 24 |
| 2.2.4 Belastningens varaktighet.....                                   | 24 |
| 2.2.5 Inverkan av uttorkning, ångdiffusion och strålning .....         | 24 |
| 2.3 Vilka möjligheter finns vid olämpliga markförhållanden?.....       | 25 |
| 2.3.1 Ökad kabelseparation.....  | 25 |
| 2.3.2 Lägre resistivitet för kabelsanden .....                         | 27 |
| 2.3.3 Ökad mäktighet för kabelsanden .....                             | 28 |
| 2.3.4 Kabelsanden som skorsten.....                                    | 29 |
| 2.3.5 Artificiell kylning.....   | 30 |
| 2.3.6 Andra åtgärder.....  | 32 |
| 3 Förslag till dimensioneringsfilosofi .....                           | 33 |
| 3.1 Nuvarande "konservativ".....                                       | 33 |
| 3.1.1 Erfarenheter från Sydvästlänken.....                             | 33 |
| 3.2 Riskbaserad (sannolikhetsbaserad).....                             | 33 |
| 3.2.1 Observationsmetoden.....   | 34 |
| 3.3 Sannolikhetsbaserad dimensionering för omgivande mark .....        | 34 |
| 3.3.1 Osäkerheter i omgivande marks egenskaper.....                    | 34 |
| 3.3.2 Förslag till dimensioneringsprinciper.....                       | 36 |
| 4 Förslag till metodik för termisk dimensionering .....                | 37 |
| 4.1 Inledning.....   | 37 |



|          |  |    |
|----------|--|----|
| 4.2      | Planerings- och byggprocessen.....   | 37 |
| 4.3      | Projekteringsfas.....  | 38 |
| 4.4      | Byggfas .....  | 41 |
| 4.5      | Organisation och dokumentflöde .....   | 42 |
| 5        | Kostnader .....  | 44 |
| 6        | Slutsatser och rekommendationer.....   | 45 |
| 6.1      | Slutsatser .....   | 45 |
| 6.2      | Rekommendationer .....   | 46 |
|          | Referenser.....  | 47 |
| Bilaga 1 | Undersökningsmetodik för HVDC kabelförläggning.<br>Termisk klassificering av kabelsträckning – Upprättande av<br>Geomodell och Geotermisk modell.<br>Version 2.1 |    |
| Bilaga 2 | Modellering - Fördelningen av markens termiska resistivitet efter<br>Sydvästlänken   |    |
| Bilaga 3 | Kabeltyp, längder och fördelning av jordarter, Sydvästlänken   |    |

## Sammanfattning

Den omgivande markens och kabelsandens termiska resistivitet påverkar temperaturen för kabeln och därmed även dimensioneringen av densamma. Jords termiska egenskaper har ett stort variationsområde, beroende på jordartstyp, mineralsammansättning och vattentillgång. Framförallt torra eller organiska jordarter har en hög termisk resistivitet. En sträcka på några meter kan vara dimensionerande för en lång kabelförläggning liknande den för Sydvästlänken.

Erfarenheterna från Sydvästlänken visar att

- Svenska kraftnät saknade i stor utsträckning erfarenhet av lång landbaserad högspänningskabel under mark varför värdet på den termiska resistiviteten för marken underskattades i projektets inledning. Den termiska designen av kabeln och dess förläggning blev därför föremål för flera uppgraderingar under projekteringen vilket skapade tidspress i projektet.
- Den termiska designen blev till stor del genomtänkt och konservativt utförd men nådde inte målen eftersom den avsedda aktiva designen, angående termiska frågor i projekteringsdirektivet, inte utfördes under anläggningsfasen. Delar av sträckan kan därför vara underdimensionerad.
- Det stora antalet projekteringsfall (minst 74 stycken) gjorde utförandet komplicerat och ställde stora krav på platsorganisationen och utföraren.

För att ta till vara gjorda erfarenheter har Svenska kraftnät initierat ett forsknings- och innovationsprojekt tillsammans med Chalmers. Målet för projektet har varit att utveckla strategin för termisk dimensionering av kabel och resultatet beskrivs i föreliggande slutrapport. Strategin omfattar alla skeden i byggprocessen och har en större tonvikt på variationen av egenskaper efter sträckningen och ingenjörsmässiga åtgärder jämfört med tidigare. Föreliggande rapport utgör också en sammanfattning av ett antal projektrapporter som utgör viktiga byggstenar för den föreslagna strategin. Totalt har fem rapporter sammanställts som behandlar bl.a. termiska processer i mark, erfarenhetsåterföring från Sydvästlänken, undersökningsmetodik samt laboratorieexperiment med termiska processer vid hög temperatur, se beskrivning i avsnitt 1.4.

Strategin kan sammanfattas i följande punkter:

- Framtagning av en geotermisk modell för den aktuella kabelsträckningen i ett tidigt skede, som sedan förfinas. Modellen beskriver fördelningen av termisk resistivitet efter sträckningen. En preliminär geomodell behövs redan i anslutning till MKB-processen eftersom kabeln beställs tidigt.
- Dimensionering av en kabel som med en standardförläggning av kabeln klarar en stor andel av kabelsträckningen. Hur stor andel beror av aktuella förhållanden men är troligen inom intervallet 60-95 %.

- För resterande del av kabelsträckningen utförs ingenjörsmässiga åtgärder. Dessa kan utgöras av 1) ökat avstånd mellan kablar (effektivt vid relativt små förändringar), 2) anpassad typ, mängd och geometri för kabelsanden (lägre resistivitet och smart utformning ger effektiv kylning), 3) kylning av kabeln med frikyla (cirkulerande vatten i slang/rör som kyls passivt mot omgivande mark). Diagram över temperaturpåverkan av sådana åtgärder beskrivs också i rapporten.
- Byggnad med den så kallade observationsmetoden, som medger användning av förberedda tekniska lösningar om inte markegenskaperna innehålls inom definierade toleranser.

Strategin förutsätter att tekniska anvisningar upprättas för den termiska dimensioneringen (en geotermisk TA-mark), att en geotermiskt Teknikansvarig finns med i hela processen och att kontrollen sköts av personer med geotermisk kompetens och med befogenheter att påverka utförandet.

Föreslagen strategi till termisk dimensionering ger:

- en systematiskt och transparent projektering med möjlighet till korrigerande åtgärder under byggtiden och tillgodogörande av driftserfarenheter
- mindre komplexitet vilket i sin tur ger betydande besparingar och mindre risker under projektering och byggande
- en jämnare temperaturfördelning utmed kabelns längd vilket påverkar livslängd, och kan medföra mindre kabeldimension eller möjlighet till framtida effekthöjningar
- möjlighet till en kompaktare förläggning av kabel (reducerade kostnader, mindre miljöpåverkan, enklare tillstånd och markåtkomst)

För att implementera den föreslagna strategin rekommenderas bl.a. att:

- Påbörja framtagandet av ett styrande dokument, tekniska anvisningar, i avsikt att implementera och förfina den termiska dimensioneringsstrategin (*geotermisk TA-mark*)
- Införliva en *geotermiskt Teknikansvarig* i såväl SVKs organisation som projektorganisationerna
- *Höja kunskapsnivån* kring termisk dimensionering hos projektledare och kontrollanter genom seminarier och andra utbildningsinsatser
- Tillämpa punkterna ovan i ett *pilotprojekt* som ett led i utvecklingsarbetet av förändrad termisk dimensionering inom projektering, bygg och drift.

För att säkerställa och utveckla dimensioneringsförfarande och dra erfarenheter av Sydvästlänkens drift rekommenderas följande forskning och innovation:

- Uppskalning av laboratorieförsök. Laboratorieexperimentet visar bl.a. på förbättrade termiska egenskaper vid hög temperatur. En uppskalning av experimentet behövs för att bekräfta dessa slutsatser.
- Utveckla och testa metoder för kompakt förläggning såsom frikyla och effektiv applicering av kabelsand. Görs med fördel i ett pilotprojekt enligt ovan.
- Utvärdering av temperaturmätningar med befintlig DTS-installation (Distributed Temperature Sensing). Genom kontinuerlig uppföljning och värdering mot förväntade egenskaper kan slutsatser dras och erfarenheterna integreras i geotermisk TA-mark och inom nya projekt.

## Summary

The thermal resistivity of the surrounding soil and cable sand affects the temperature of a buried high voltage electrical cable and hence the design of the same. The soils thermal characteristics has a large variation, depending on soil type, the mineral composition, the density and the water content. In particular, dry or organic soil has a high thermal resistivity. A distance of a few meters can be limiting for the design of a long cable route, similar to the South-West Link (Sydvästlänken).

The experience of the South-West Link shows that

- Svenska kraftnät (Swedish National Grid for Electricity) has lack of extensively experience from long onshore buried high-voltage cable. The value of the soil thermal resistivity was therefore underestimated in the initial part of the project. The thermal design of the cable and the cable geometric configuration was consequently the subject of several upgrades during the design, which created time constraints in the project.
- The thermal design was largely conceived and executed conservatively but did not reach the goals, as the intended active design regarding thermal issues in the design directive, was not performed during the construction phase. Parts of the route can be undersized.
- The large number of engineering cases (at least 74 cases) made the implementation complicated and put great demands on the site organization and the contractor.

To take advantage of lessons learned, Svenska kraftnät has initiated a research and innovation project together with Chalmers. The goal of the project have been to develop the strategy for the thermal design of the cable and the results are described in this final report. The strategy covers all stages of the construction process and have a greater emphasis on the variety of thermal properties after the cable route and engineering design solutions, compared to the previous strategy. This report also provides a summary of a number of project reports that provide essential components for the proposed strategy. A total of five reports has been compiled; including the thermal processes in the soil, feedback of experiences from the West Link, survey methodology and laboratory experiments with thermal processes at high temperature.

The strategy can be summarized as follows:

- Development of a geothermal model for the current cable route in the early stages, which is then refined. The model describes the distribution of thermal resistivity after the cable route. A preliminary geo-model is needed already in the connection to the EIA-process.
- Design of a cable with one standard installation that can be used for a large portion of the cable route. What percentage depends on the current conditions but is probably in the range of 60-95%.

- Engineering measures is performed for the remaining part of the cable route. Examples of such engineering measures are 1) increasing distance between cables (effective at relatively small changes), 2) custom type, quantity and geometry for the cable sand (lower thermal resistivity and smart design provides efficient cooling), 3) cooling of the cable with circulating water in pipes. The pipes are cooled passively to the surrounding soil. Graphs of temperature effects of such measures are also described in the report.
- Construction with the so-called Observational method, which allows the use of prepared technical solutions if the soil properties are not contained within defined tolerances.

The strategy requires that a manual is established for the thermal design and construction process, that a geothermal Technical manager is involved in the entire process and that the control is handled by geothermal expertise with authority to influence the performance and implementation.

Proposed approach to thermal design provides:

- a systematic and transparent project process with the possibility of corrective measures during the construction phase and feedback of operating experience
- less complexity, which in turn provides significant savings and fewer risks during the design and construction phase
- a more uniform temperature distribution along the length of the cable which affect technical lifetime, and may result in smaller cable size or potential for future power capacity increases
- the possibility of a more compact installation of the cable (reduced costs, less environmental impact, and simplified land access)

To implement the proposed strategy it is recommended to:

- Begin development of a governing document in order to implement and refine the thermal design strategy (geothermal technical manual)
- Incorporate a geothermal Technical manager in both Svenska kraftnäts organization and project organizations for a specific cable-project
- Raise the level of knowledge about the thermal cable design in relevant parts of the organization
- Applying the above points in a pilot project as part of the development of the thermal strategy, in the design, construction and operation phases.

To ensure and develop the design process and learn lessons from the South-West Link operation phase, the following research and innovations are recommended:

- Scale-up of laboratory experiments. The performed laboratory experiment shows improved thermal properties at high temperature. A scale-up of the experiment is needed to confirm these findings.
- Develop and test methods for compact installation of cable such as free cooling and efficient application of cable sand. Can be combined with a pilot project as described above.
- Evaluation of temperature measurements with existing DTS installation (Distributed Temperature Sensing). Through continuous monitoring, measurement and evaluation against the expected thermal characteristics, conclusions can be drawn and experience integrated into the proposed geothermal technical manual and in new projects.

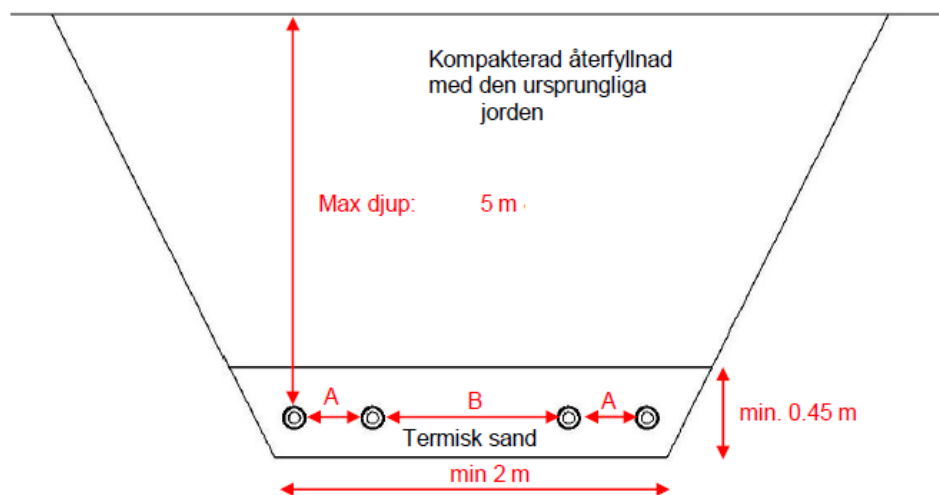
# 1 Bakgrund och syfte

## 1.1 Introduktion - Längdskalan för omgivningens termiska påverkan

Markens och kabelsandens termiska resistivitet påverkar temperaturen för kabeln och därmed även dimensioneringen av densamma. Jordens termiska egenskaper har ett stort variationsområde, beroende på jordartstyp och vattentillgång. Men det är inte medelvärdet av egenskaperna som är dimensionerande utan egenskaperna i ca 1-5 m skalan för den del av kabeln som har den högsta termiska resistiviteten i naturlig jord. För en kabelsträcka på 10 mil kan således teoretiskt den termiska resistiviteten för en längd på 5 m vara dimensionerande, d.v.s. 99.995 percentilen av fördelningens egenskaper efter sträckningen. Ett begränsat avsnitt med grovkornig sand med en lågt liggande grundvattenyta kan således vara dimensionerande för en kabel, som i övrigt är belägen i jord med lägre termisk resistivitet. Det är därför viktigt att känna till *vilka* potentiellt lågt värmetransporterande jordarter som förekommer efter linjesträckningen, *var* de är belägna samt *hur* vattenförhållandena ser ut under en längre tidsperiod.

För kabelsand, som packas runt kablarna, gäller speciellt att den generellt skall vara en god värmeledare och att den inte skall ge ökat värmemotstånd vid högre temperaturer som orsakats av uttorkning p.g.a. ångdiffusion mm.

Principen för kabelförläggning framgår av Figur 1. Borrard förläggning förekommer också under vägar och i känsliga områden (torvområden för Sydvästlänken).



Figur 1 Princip för kabelförläggning i jord vid Sydvästlänken. Kablarna för Sydvästlänken har i allmänhet lagts i kabelgrav på minst 1.2 m djup och på en packad bädd av kabelsand (termisk sand). Därefter har de kringfyllts med kabelsand som kompakterats. Slutligen har återfyllning skett med ursprunglig jord.



## 1.2 Erfarenheter från Sydvästlänken

Svenska kraftnät har nyligen genomfört det största landkabelprojektet i Sverige, Sydvästlänken. Den termiska designen av kabeln och dess förläggning blev föremål för flera uppgraderingar under projekteringen vilket skapade tidspress i projektet.

Den slutliga lösningen blev att använda 2590 mm<sup>2</sup> kabel i jord som förväntades ha högre termisk resistivitet, s.k. Typ B-jord samt organisk jord, och 2010 mm<sup>2</sup> kabel i övrigt jord med förväntad lägre termisk resistivitet (med typ B-jord avses grövre jord med förutsättningar till låg vattenhalt). Detta kunde dock inte genomföras konsekvent eftersom kabeldelarna hade fixerad längd vilket innebar att i vissa partier hamnade 2010 mm<sup>2</sup> kabel i Typ B-jord och avsikten var att där utföra aktiv design av kabelinstallationen vid misstanke om hög termisk resistivitet i marken. För sträckningen i övrigt fanns hela 74 stycken projekteringsfall av kabelläggning med varierande djup, cc-avstånd, kabeltyp och kabelsand.

En erfarenhetsåterföring från projektet avseende termiska frågor har utförts (Lidén & Sundberg, 2015). De övergripande slutsatserna är följande:

- Den termiska designen var till stor del väl genomtänkt och konservativt utförd men nådde inte målen eftersom den avsedda aktiva designen, angående termiska frågor i projekteringsdirektivet, inte utfördes under anläggningsfasen.
- Delar av sträckan som består av Typ B jord med den mindre 2010 mm<sup>2</sup> kabeldimension kan vara starkt underdimensionerad trots den ”konservativa” dimensioneringsfilosofin (se Bilaga 3 för aktuella sträckor).
- Det stora antalet projekteringsfall (minst 74 st) gjorde utförandet komplicerat och ställde stora krav på platsorganisationen och utföraren.
- Det är viktigt att Svenska kraftnät har en ansvarig person som garanterar att termiska frågor blir en del av hela genomförandeprocessen, från tidiga förundersökning till slutliga konstruktion och kontroll.
- Genom DTS-mätningar (Distributed Temperature Sensing) i den installerade fiberoptiska kabeln får man efterhand resulterande temperatur efter sträckningen. Slutliga stationära förhållande erhålls dock inte förrän efter i storleksordningen 10 år. Genom kontinuerlig uppföljning och värdering av DTS-mätningar mot förväntade egenskaper för kabelsand och omkringliggande jord kan slutsatser dras betydligt tidigare. På grund av förseningar i driftsättningen av Sydvästlänken så har inte sådan värdering kunnat utföras i innevarande projekt.

### 1.3 Syfte

Syftet med denna rapport är att utveckla strategin för den termiska dimensioneringsprocessen i olika skeden, för att komma till rätta med de olägenheter som erfarenheterna från Sydvästlänken visat. Utvecklingen av den termiska dimensionering föreslås ske genom framtagning av en strategi för såväl projektering- som byggskedet med större tonvikt på variationen av egenskaper efter sträckningen och ingenjörsmässiga åtgärder jämfört med tidigare. Tekniska anvisningar föreslås som innehåller alla skeden, projekterings-, bygg- och driftskedet. Rapporten bygger på tidigare rapportering enligt avsnitt 1.4.

En jämn temperaturutveckling bör eftersträvas efter en kabelns sträckning för att möjliggöra framtida effekthöjningar och likvärdigt åldrande.

### 1.4 Hela arbetets omfattning

Föreliggande rapport ingår i en utvecklingsatsning från Svenska kraftnät tillsammans med Chalmers. Följande rapporter ingår:

1. Evaluation of thermal transfer processes and back-fill material around buried high voltage power cables. Jan Sundberg. Rapport 2016:5, 2015
2. South West Link - Feedback of experience from thermal design. Peter Lidén and Jan Sundberg. Rapport 2016:6, 2015.
3. High temperature performance for high voltage underground cables in cable sand. Laboratory experiment. Peter Lidén, Jan Sundberg and Andreas Lilliestierna Rapport 2016:7, 2016
4. Thermal classification of cable route. Andreas Lilliestierna and Johan Utas. Department of Civil and Environmental Engineering, Division of Geo-Engineering, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 2015. Master's Thesis 2015:40 (*Vidareutvecklad undersökningsmetodik finns i Bilaga 1 i föreliggande rapport*)
5. Strategi för termisk dimensionering av markförlagd högspänningskabel. Förslag till utvecklade dimensioneringsprinciper. Slutrapport. Jan Sundberg. (Föreliggande rapport) Rapport 2016:8

Den första rapporten innehåller en genomgång av de termiska processer som är aktuella för kablar i mark, speciellt vid hög temperatur. Bilagd rapporten finns också en omfattande litteraturstudie av Nathali Cuotto samt definitioner av vanligen förekommande begrepp i rapporten. Därutöver diskuteras marktemperaturer i Sverige. Denna rapport utgör underlaget och motivet för de experimentella försöken som beskrivs i rapport 3.

I rapport nummer två beskrivs de erfarenheter som dragits vid byggande av Sydvästlänken. Denna rapport bildar ett viktigt underlag för föreliggande rapport, rapport 5.

I den tredje rapporten utförs orienterande laboratorieförsök med syfte att klarlägga förekommande processer närmast kabeln vid hög temperatur.

Den fjärde rapporten utgörs av ett examensarbete. Den innefattar en utvecklad undersökningsmetodik för termisk klassificering av en kabelsträckning. Undersökningsmetodiken har sedan vidareutvecklats, se Bilaga 1.

Den sista och föreliggande rapporten beskriver ett förslag till utvecklad strategi för termisk dimensionering och bygger på de tidigare rapporterna. Denna rapport utgör också en slutrapport för projektet.

## 2 Kabelns temperatur

### 2.1 Vad påverkar kabelns temperatur?

Kabelns temperatur påverkas av följande faktorer:

1. Termiska egenskaper i marken för den aktuella delsträckan
2. Naturlig ostörd temperatur i marken och dess variation
3. Kabelsandens termiska egenskaper, omfattning och geometri
4. Kabeltyp, ledarmaterial, kabelarea och antal kablar
5. Förläggingsdjup för kabel
6. Avstånd mellan kablar
7. Dimensionerande strömstyrka (avgiven värmeeffekt) för kabeln och dess varaktighet

Punkt 2, men framförallt punkt 1, varierar naturligt efter sträckningen och gör det dessutom förhållandevis småskaligt. Punkt 3-7 kan man ofta styra och avpassa så att temperaturen på kabeln avpassas.

Det är därför fundamentalt att man har god kännedom över de termiska egenskaperna i marken efter sträckningen eftersom de utgör den del man ej kan påverka. Utgående från dessa förhållanden kan dimensioneringen utföras och åtgärder projekteras i riskområden.

Markens termiska egenskaper, enligt punkt 1, varierar i både tid och rum. I tid eftersom den termiska resistiviteten ökar med sänkt vattenhalt. Vattenhalten nära markytan och på kabeldjup förändras över året när avdunstningsförhållanden och grundvattennivåer varierar. I rum eftersom markförhållandena varierar efter sträckningen. Högst termisk resistivitet finns i ensgraderade sandiga och grusiga jordarter ovanför grundvattenytan samt i organiska jordar. Markens termiska egenskaper varierar också med temperaturen och vid höga temperaturer blir andra transportprocesser än värmeledning väsentliga, se Sundberg, 2015. Utmaningen ligger i att prognosticera de termiska egenskaperna efter sträckan på ett relevant sätt så att relevanta egenskapsmodeller kan skapas.

Punkt 2, marktemperaturen, är förhållandevis enkel att mäta och beräkna men behovet underskattas just därför ibland. En god uppskattning av medelmarktemperaturen i södra Sverige är årsmedeltemperaturen för platsen. I mellersta och norra Sverige är temperaturen högre än årsmedeltemperaturen på grund av inverkan isolerande snö och fryseffekter.

Kabelsand (kringsfyllningen) (3) skyddar kabeln från yttre åverkan och fungerar termiskt ytförstorande och sänker därmed yttemperaturen på kabeln. Är den termiska resistiviteten hög i marken kan kabelsand i någon mån kompensera för detta om den har låg termisk resistivitet. Kvalitet, omfattning och geometri för kabelsand kan påtagligt påverka kabelns temperatur och motverka inverkan av hög termisk resistivitet i

marken. Vid högre temperaturer blir inverkan av ångdiffusion påtaglig. Kabelsandens förmåga att hålla vatten är därmed en viktig faktor för att motverka uttorkning kring kabeln som drastiskt kan öka den termiska resistiviteten.

Typ av kabel och den ledande arean (4) påverkar dess temperatur. Kabelns förläggning (5) vill man ha så ytligt som möjligt men med upprätthållande av ett minsta djup. Förläggningen styrs emellertid också av terrängförhållanden, korsningar och andra hänsynstaganden. Att öka avståndet mellan kablarna (6) för att reducera temperaturen är en enkel åtgärd men medför ökad markåtgång, schakt och mängd kabelsand. Av olika anledningar kan schaktbredden ibland behöva begränsas. Kabelns dimensionerande överföringsförmåga är ofta given på förhand men inte alltid varaktigheten (7).

## 2.2 Hur påverkas kabelns temperatur?

Kabelns temperatur påverkas av en rad faktorer som beskrivits i föregående avsnitt. Utgångstemperaturen bestäms i stort av medeltemperaturen på markytan med tillägg för en dämpad variation på kabeldjup från årstidsväxlingarna. När kabeln strömsätts så skapar den elektiska resistansen en värmeproduktion, som också är temperaturberoende. En värmekudde runt kabel byggs succesivt upp men slutdestination för den producerade värmen är markytan. Det tar lång tid innan stationära förhållanden uppträder och temperaturen inte förändras med tiden.

Tiden närmast efter strömsättningen styrs temperaturutvecklingen för kabeln av värmemotståndet i kabelsandens närmast kabeln (kabelsandens termiska resistivitet) och inverkan av de andra kablarna värmeproduktion (de innersta blir varmest). En tid därefter börjar kabelns temperatur påverkas av den omgivande markens termiska resistivitet. Denna kan variera kraftigt efter linjesträckningen, till skillnad från kabelsandens egenskaper, som är förhållandevis konstanta. Vid högre temperaturer förekommer, förutom värmeledning, även inverkan av främst strålning och ångdiffusion. Den senare processen kan i ogynnsamma fall höja den termiska resistiviteten närmast kabeln varför det är viktigt att dimensionera kabelsandens goda vattenhållande egenskaper som motverkar uttorkning.

Nedan beskrivs närmare hur några olika faktorer påverkar kabeltemperaturen.

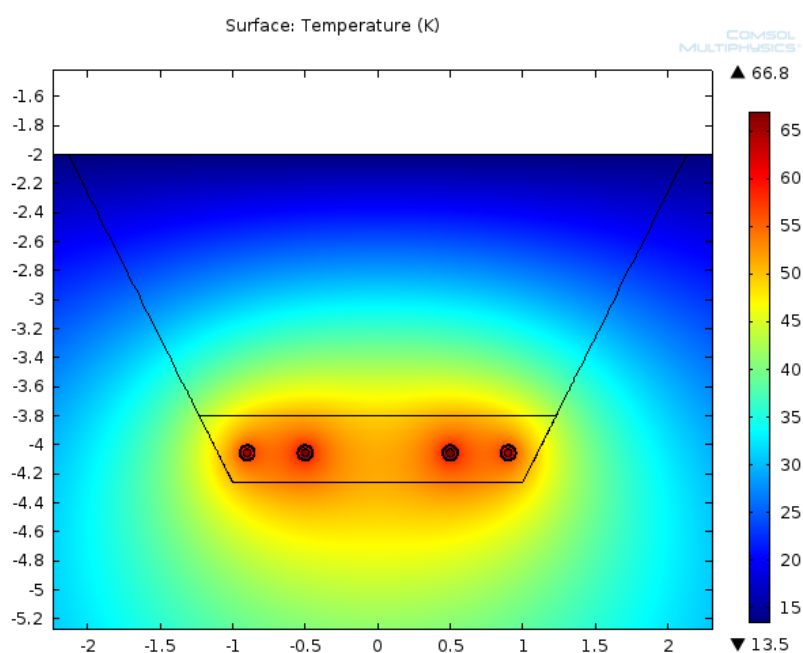
### 2.2.1 Hög termisk resistivitet i omgivande mark

Inverkan av hög termisk resistivitet i marken ger upphov till hög kabeltemperatur. I anslutning till projekteringen av Sydvästlänken utfördes undersökningar av termisk resistivitet efter linjesträckningen och därtill kommande modelleringar, se Sundberg, 2012.

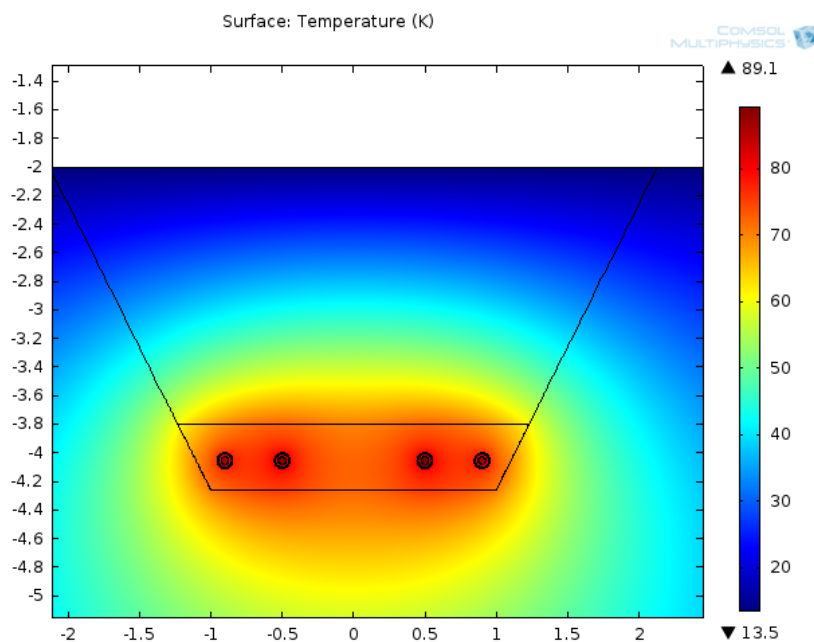
Termisk resistivitet i jord påverkas i första hand av vattenhalt, densitet, mineralogi och organiskt innehåll. Låg vattenhalt och densitet och hög organisk halt ger en hög termisk resistivitet. Termisk resistivitet i *torv* är hög även vid vattenmättade förhållanden. Medelvärde av samtliga fältmätningar i *torv* är ca 1.67 (m·K)/W och variansen är låg

vid vattenmättnad. 5-percentilen är ca 2.13 (m·K)/W och 1 percentilen 2.38 (m·K)/W av fördelningen.

Känsligast för vattenhaltsförändringar är grovkorniga friktionsjordarter, d.v.s. grövre sandjordar och moräner, så kallade typ B-jordar i SV-länken samt låghumifierad torv. Typ B-jorden har 5- respektive 1-percentil av fördelningen för termisk resistivitet vid 1.54 (m·K)/W respektive 2.22 (m·K)/W, baserat på Monte Carlo simulering. I Figur 2 respektive Figur 3 visar inverkan på temperaturen av dessa två percentiler. I första fallet klaras designtemperaturen 70°C medan den i det andra fallet överskrids den med ca 20°C.



**Figur 2** Beräkning av temperaturfördelning runt kablar. Projekteringsfall 4a i Sydvästlänken med kabeldimension 2010 mm<sup>2</sup>, kabelseparation 0.4-1.0-0.4m och en termisk resistivitet för omgivande Typ B-jord enligt 5-percentilen (1.54 m·K/W), kabelsand (1.0 m·K/W). Vid stationära förhållanden, efter ungefär 10 års drift, uppgår ledartemperaturen till 66.8 °C.

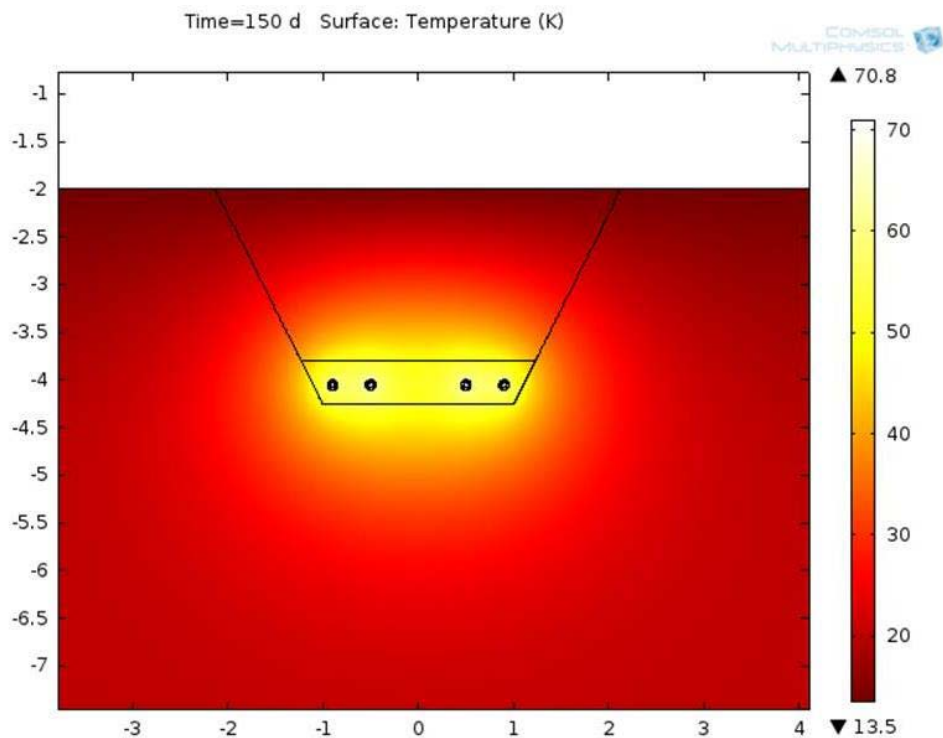


**Figur 3** Som Figur 2 men termisk resistivitet för omgivande Typ B-jord enligt 1-percentilen (2.22 m·K/W), kabelsand (1.0 m·K/W). Vid stationära förhållanden når ledartemperaturen 89.1 °C enligt modelleringen.

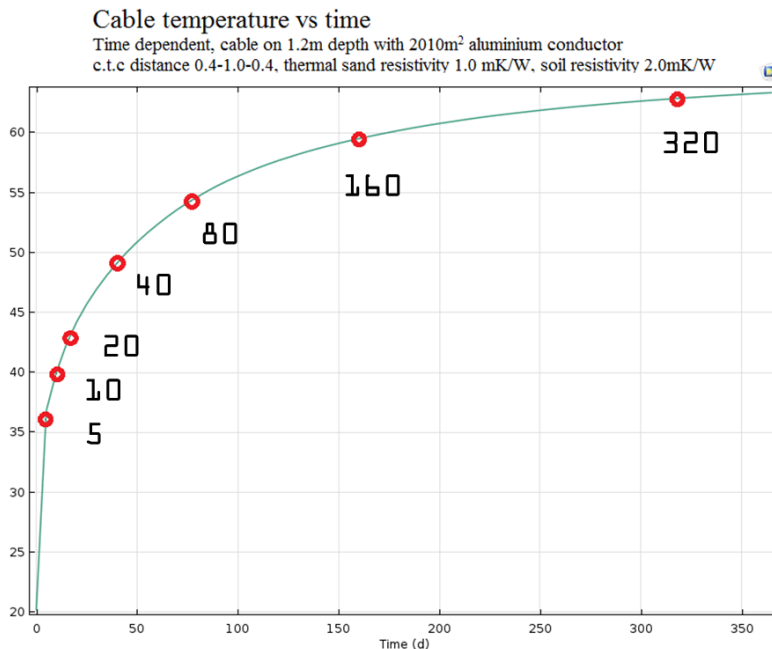
### 2.2.2 Tidsskala

Den maximala temperaturen erhålls inte förrän efter ca 10 år. I Figur 4 visas temperaturfördelningen efter 150 dagar för fallet med att 1-percentilen för Typ B-jord används (se avsnitt 2.2.1). Ledartemperaturen blir då 70.8°C. I det här fallet tar det således så mycket som ett halvt år att uppnå designtemperaturen, och i storleksordningen 10 år att uppnå maxtemperaturen. Detta innebär t.ex. att en tillfällig sänkning av effekten också får stor inverkan på temperaturen.

Figur 5 visar temperaturökningen med tiden. För korta effektpulser, upp till några dagar, hinner inte inverkan av den naturliga jordens termiska resistivitet påverka kabelns ledartemperatur. Inverkan av pulsen stannar således i kabelsanden som i det aktuella fallet har lägre termisk resistivitet är jorden utanför (Figur 6).

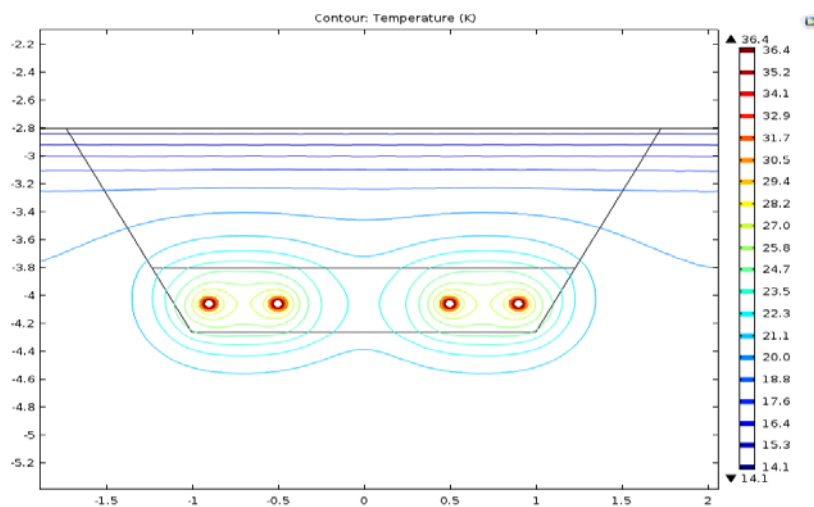


Figur 4 Som Figur 3 men bilden visar temperaturfördelningen (vid transienta förhållanden) efter 150 dagar då temperaturen når 70.8 °C, vilket kan jämföras med ca 89°C vid stationäritet. Värme- kapacitet  $3.6 \cdot 10^6 \text{ J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$ .



Figur 5 Ledartemperaturens ökning med tiden. Maximal temperatur, vid stationära förhållanden, inträder först efter många års drift. Kablar förlagda på 1.2 m djup med separation 0.4-1.0-0.4 m. Termisk resistivitet för kabelsand 1.0 m·K/W och för naturlig jord 2.0 m·k/W. Den använda värmekapaciteten i beräkningen är för båda materialen  $3.6 \cdot 10^6 \text{ J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$ .





Figur 6 Temperaturfördelningen efter 5 dagar, Data från Figur 5.

### 2.2.3 Ursprunglig marktemperatur

En god approximation för markens medeltemperatur är medeltemperaturen i luft för den aktuella platsen, speciellt i södra Sverige. Längre norrut får man räkna med en något högre marktemperatur på grund av snötäcke vintertid som isolerar mot kyla samt tjälprocesser.

Temperaturen på kabeldjup varierar dock över året men variationerna dämpas och fäsförskjuts något jämfört med lufttemperaturen, se t.ex. Sundberg, 2015.

Marktemperaturen kan således predikteras förhållandevis bra och man kan även ta hänsyn till olika scenarier avseende klimatförändring.

### 2.2.4 Belastningens varaktighet

Strömbelastningen och dess varaktighet har stor betydelse för ledarens temperatur. Approximativt är ledartemperaturen direkt proportionell mot effektavgivningen från kabeln. Om kabeln i medeltal transporterar full effekt 90 % av tiden och halv effekt resterande tid blir medeleffekten per år ca 95 % av full effekt.

### 2.2.5 Inverkan av uttorkning, ångdiffusion och strålning

Kabelns sand är näst efter kabeln den konstruktionsdel som utsätts för högst temperatur. Vid höga temperaturer består värmetransporten inte bara av värmeledning utan även av ångdiffusion och strålning. En vätsketransport initieras från kabelns sand närmast kabeln och kan leda till uttorkningen (ökat värmemotstånd) om inte den vattenhållande förmågan är tillräckligt stor så att motsvarande vätsketransport i motsatt riktning sker och balans erhålls. Detta diskuteras i Sundberg, 2015.

Värmetransporten vid hög temperatur är komplicerad och olika tolkningsmöjligheter finns avseende tillgänglig litteratur kring detta. I projektet har genomförts orienterande laborieförsök (Lidén et al, 2015). Resultat från försöken visar att ingen uttorkning

tycks ske nära värmaren ("kabeln") och att det istället tycks vara möjligt att tillgodoräkna en lägre "effektiv" termisk resistivitet, orsakad av ångdiffusion som ger ett tillskott till värmetransporten. Detta sammantaget indikerar att den termiska dimensioneringen av kabelsanden skulle kunna göras mindre konservativ.

Resultaten är intressanta och går stick i stäv med tidigare publicerade endimensionella försök. Orsaken till skillnaderna förklaras troligen av randvillkor och dimensionalitet (1D vs 3D). Processerna är emellertid skalberoende varför resultaten behöver verifieras i större skala.

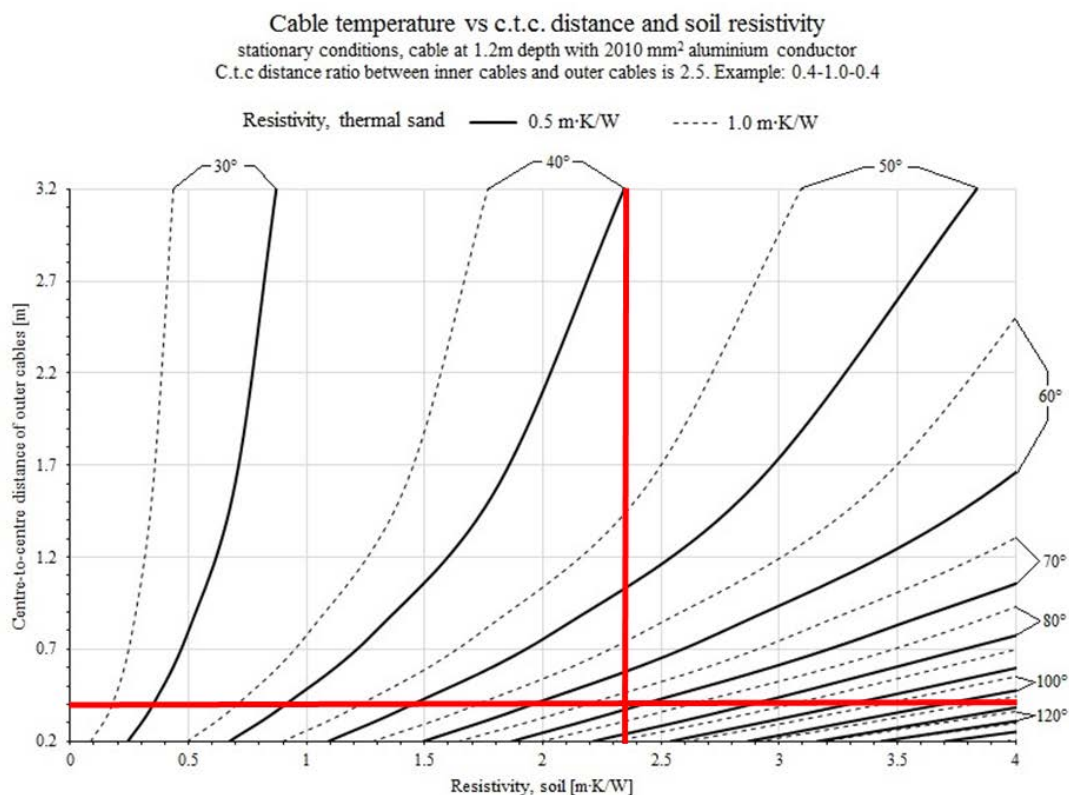
### 2.3 Vilka möjligheter finns vid olämpliga markförhållanden?

I de kommande avsnitten exemplifieras några olika möjligheter att med ingenjörsmässiga åtgärder minska kabeltemperaturen vid mer utsatta partier.

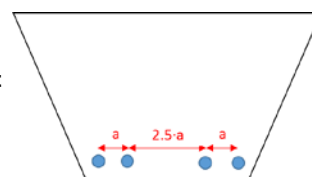
#### 2.3.1 Ökad kabelseparation

Kablarna i kabelgraven har en viss separation, se Figur 1. Genom att öka avståndet mellan kablarna erhålls en lägre högsta ledartemperatur vid stationära förhållanden, se Figur 7. Exemplet i rött visar att ledartemperaturen kan halveras från 80°C till 40°C om förhållandet mellan centrumavstånden ( $a$ ) ökar från 0.4 till 3.2 i jord med termisk resistivitet i kringliggande jord om 2.35 m·K/W. Detta motsvarar temperaturminskningen om cc-avstånden bibehålls men termisk resistivitet i kringliggande jord minskas med 60 % till ca 0.9 m·K/W.

Ökad kabelseparation har använts vid dimensioneringen av Sydvästlänken och är effektiv vid små eller moderata förändringar. Effekten blir emellertid mindre och mindre vid ökat cc-avstånd och kabelgraven blir efterhand mycket bred, varför andra åtgärder är mer effektiva. Om  $a=0.4$  m erhålls en total kabelgravsbredd om ca 2.5 m men om  $a$  ökas till 2 m blir kabelgravens bredd till knappt 10 m.



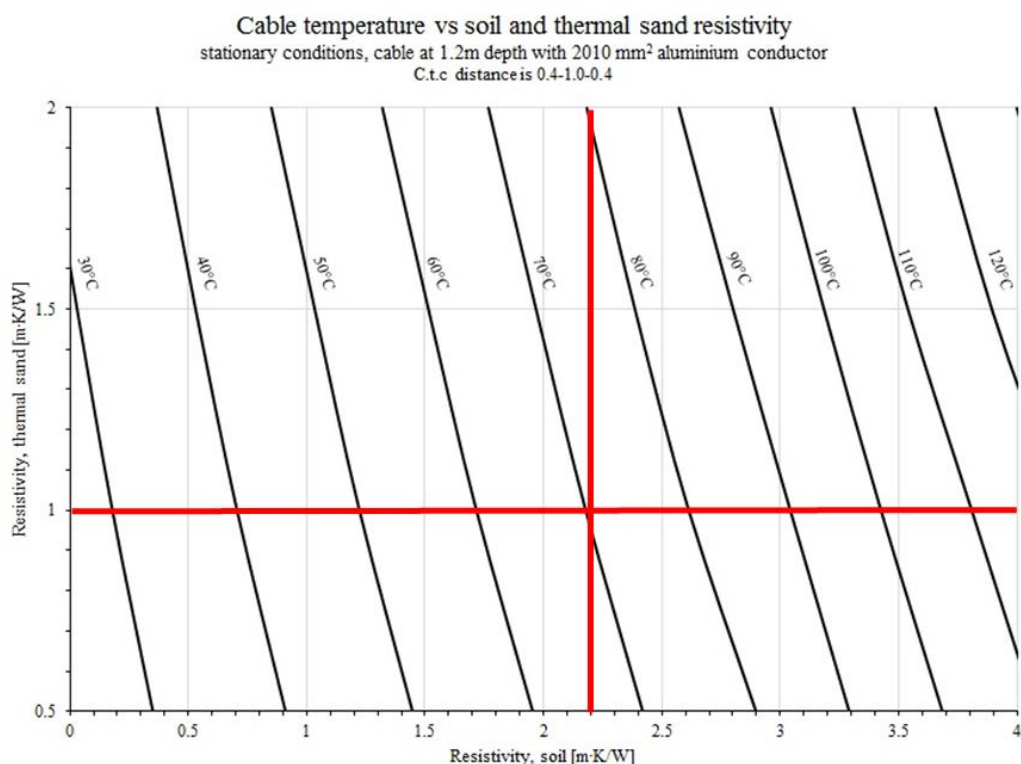
**Figur 7** Inverkan på den högsta ledartemperaturen av varierande kabelseparation mellan kablar, termisk resistivitet i naturlig jord samt termisk resistivitet i kabelsand. På den vertikala axeln visas avståndet "a" mellan yttre kablar i respektive kabelpar. Förhållandet mellan avståndet mellan paren och avståndet i respektive par förutsätts vara 2.5, se angränsande figur (t.ex. 0.4-1.0-0.4). Data för beräkningarna utgörs av: 0.4-1.0-0.4, djup 1.2 m och 2010 mm<sup>2</sup> aluminiumledare.



### 2.3.2 Lägre resistivitet för kabelsand

Genom att minska den termiska resistiviteten för kabelsandens erhålls en lägre högsta ledartemperatur, se Figur 8. Inverkan av bättre kabelsand blir dock begränsad vid hög termisk resistivitet i den omgivande jorden eftersom den senare styr värmeledningen vid stationära förhållanden. Exemplet i figuren visar att ledartemperaturen ökar 10°C om resistiviteten i kabelsandens fördubblas och minskar knappt 5°C om den halveras.

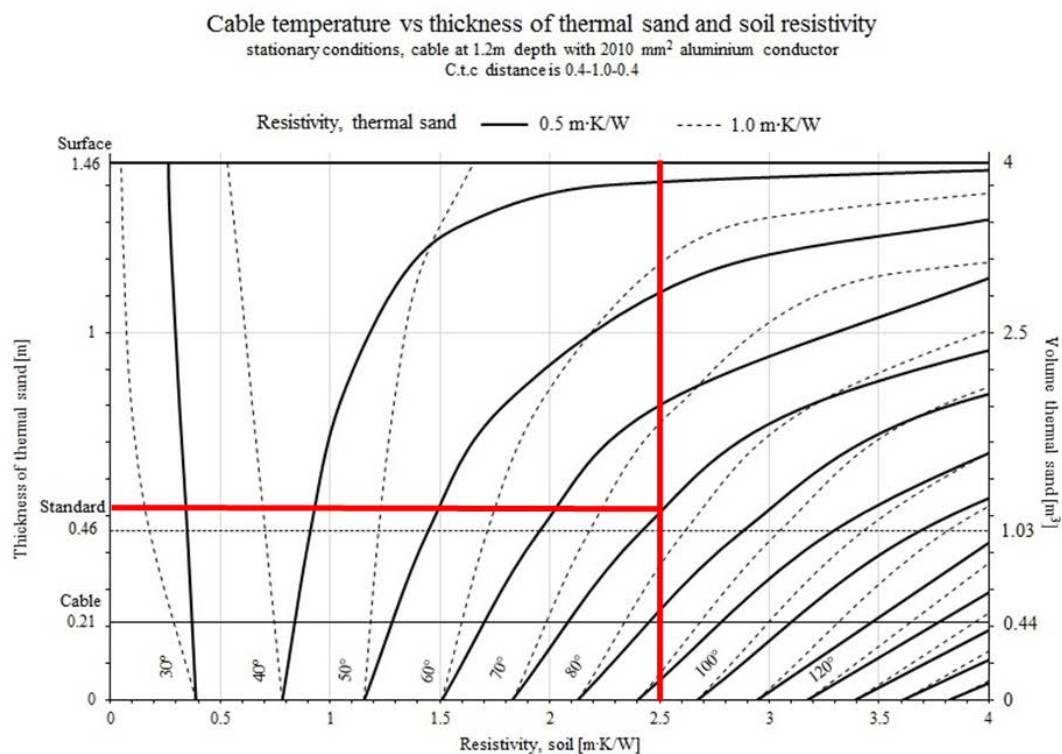
Inverkan av korta pulser blir betydligt mindre vid lägre resistivitet i kabelsandens eftersom dessa inte når utanför densamma, se Figur 6. Lägre resistivitet i kabelsandens ger också lägre temperaturgradient närmast kabeln vilket bedöms motverka uttorkning.



Figur 8 Inverkan på den högsta ledartemperaturen av varierande termisk resistivitet i kabelsand och termisk resistivitet i omgivande naturlig jord. Data för beräkningarna utgörs av: kabelseparation 0.4-1.0-0.4, djup 1.2 m och 2010 mm<sup>2</sup> aluminiumledare.

### 2.3.3 Ökad mäktighet för kabelsand

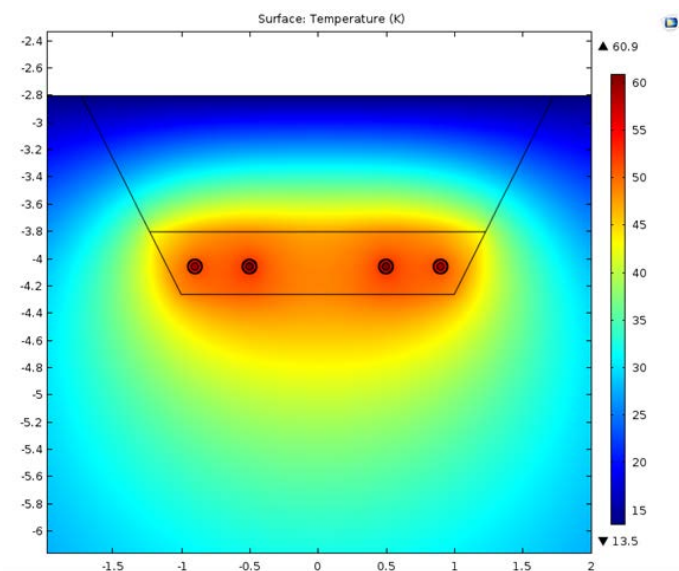
Genom att öka mäktigheten för kabelsandens termiska resistivitet för kabelsandens erhålls en lägre maximal ledartemperatur, se Figur 9. Inverkan blir större för större skillnad mellan kabelsandens och jordens termiska resistivitet. Av det rödmarkerade exemplet visas att temperaturen kan minskas med 30°C, från 70°C till 40°C, genom att öka mäktigheten för de angivna förhållandena.



Figur 9 Inverkan på den högsta ledartemperaturen av kabelsandens mäktighet, dess termiska resistivitet samt termisk resistivitet i omgivande naturlig jord. Mäktigheten varierar från ingen alls, till ända upp till markytan. Av figuren framgår också volym kabelsand som ökar mer än höjden pga. släntlutningarna. Data för beräkningarna utgörs av: kabelseparation 0.4-1.0-0.4, djup 1.2 m och 2010 mm<sup>2</sup> aluminiumledare.

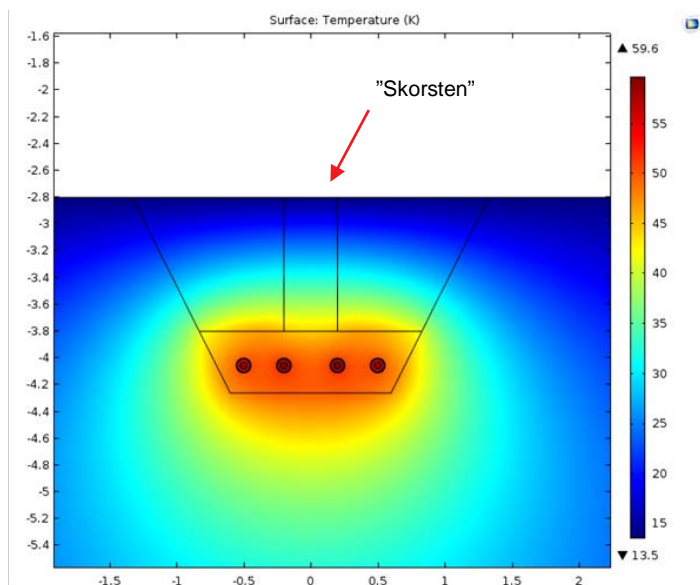
### 2.3.4 Kabelsanden som skorsten

I Figur 10 och Figur 11 jämförs en normal kabelförläggning med en kompakt förläggning försedd med ”skorsten” av kabelsand, en stående skiva. Kabelgravens bredd kan reduceras avsevärt och schaktvolymen minskar med 30 % för det aktuella exemplet.



Figur 10 Högsta ledartemperatur vid normal förläggning. Data för beräkningarna utgörs av: kabelseparation 0.4-1-0.4, kabeldjup 1.2 m, 2010 mm<sup>2</sup> aluminiumledare, termisk resistivitet jord resp. kabelsand är 2 m·K/W resp 0.5 m·K/W.

Standardfall, 1.2m djup, cc 0.4-1.0-0.4, kabelsandstjocklek 0.46m  
Jord 2.0 mK/W, sand 0.5 mK/W. Normalkabel (2010mm<sup>2</sup>)



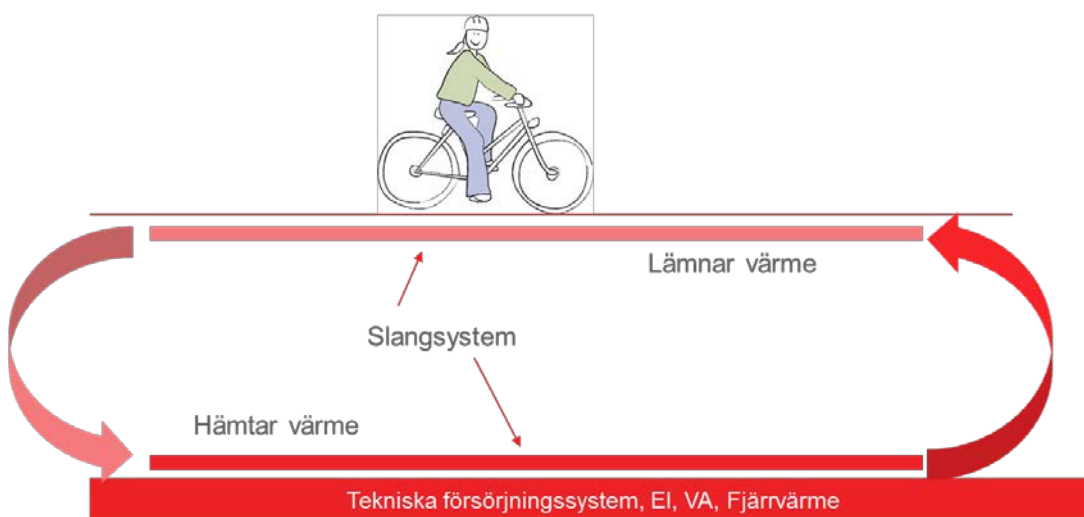
Figur 11 Högsta ledartemperatur vid kompakt förläggning och med ”skorsten”. En 0.4 m bred kolonn (skorsten eller skiva) med kabelsand förbinder kringfyllningen med markytan. Mindre cc-avstånd kan erhållas utan högre temperatur, och därmed mindre totalbredd på kabelgraven. Åtgången av kabelsand blir ungefär likvärdig för de två fallen medan schaktvolymen minskar från 4 m<sup>3</sup> per längdmeter för normalfallet till 2.8 m<sup>3</sup> per längdmeter för skorstensfallet, eller ca 30 %. Avvikande data för beräkningarna jämfört med Figur 10 utgörs av: kabelseparation 0.3-0.4-0.3.

”Skorstensfallet”, 1.2m djup, cc 0.3-0.4-0.3.  
Jord 2.0 mK/W, sand 0.5 mK/W. Normalkabel (2010mm<sup>2</sup>)

### 2.3.5 Artificiell kylning

Där andra metoder är svåra att genomföra eller inte får tillräcklig effekt är artificiell kylning ett alternativ, via frikyla (passiv kylning) eller aktiv kylning. De förstnämnda är att föredra på grund av sin enkelhet och innebär att en eller flera slangar läggs i kabelschakten i kablarnas närhet. En vätska cirkuleras i slangarna, värms upp och kyls mot omgivande mark, borrhål eller markyta, se Figur 12. Vi borrad förläggning kan anslutning ske direkt till skyddsroret. Till detta krävs endast strömförsörjning för en eller dubblerad cirkulationspump.

Värmepump kan också användas (aktiv kylning) och den producerade värme kan då nyttjas för uppvärmning av närliggande lokaler, eller kylas bort. Vinsten blir lägre ledartemperatur, lägre elektriska förluster och möjlighet att nyttja restvärmen som i vissa fall kan ge sekundära positiva miljöeffekter.



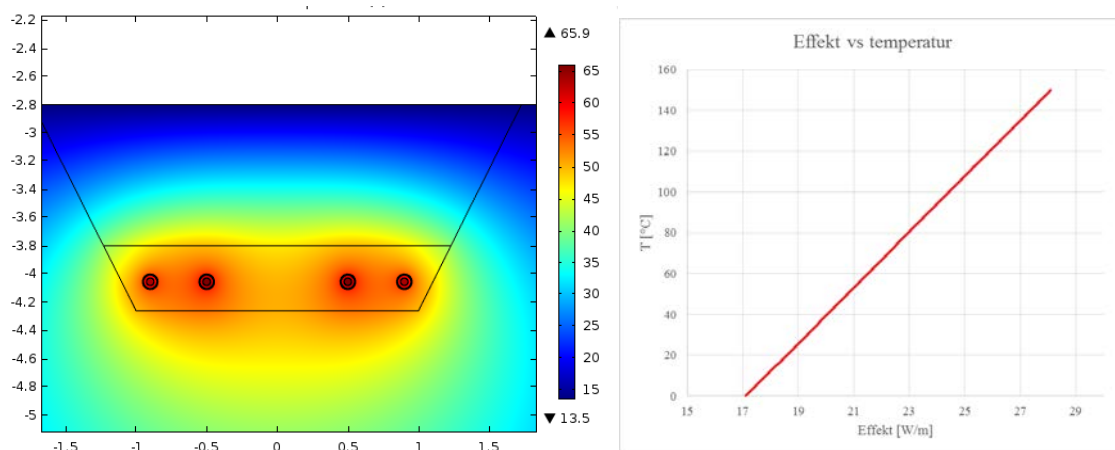
Figur 12 Kylning av kabel med ett slangsystem med cirkulerande vätska. I det aktuella fallet exemplifieras ett nyttiggörande av värme med uppvärmning av en cykelbana. Bild: Jan Sundberg, 2013. Från Sundberg & Lidén, 2014.

Speciellt intressant är artificiell kylning för kablar i rör genom styrd borring under torvmosse och förläggning av skyddsror. Torv har hög termisk resistivitet och medför hög ledartemperatur vid normal dimensionering. Stora avstånd mellan ytterrören ( $\approx 10$  m, beror av bl.a. djup) krävs därför vilket ger stor utbredning av förläggningen.

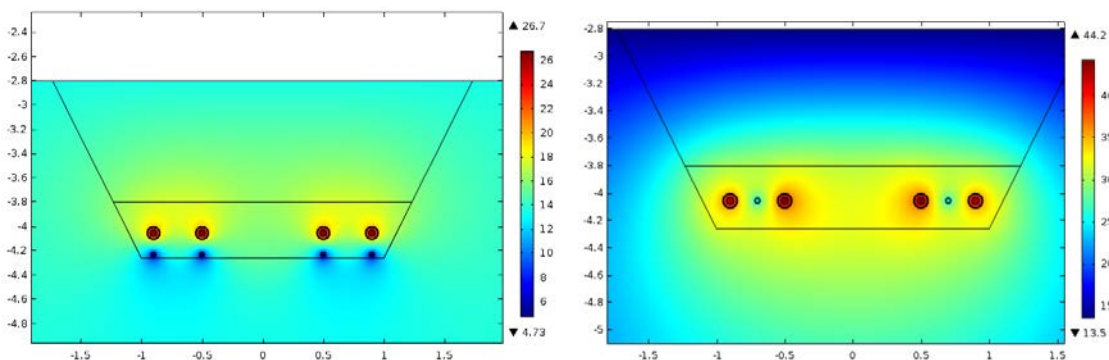
I Sydvästlänken användes bentonit som kontaktmedel mellan kabel och rörvägg. Vid artificiell kylning kan kabelröret istället fyllas med vatten vilket cirkulerar och kopplas till separat PE-slang som kyls mot omgivningen. Detta alternativ är effektivt och eliminerar också användningen av bentonit som kan ha negativa effekter på framförallt vattenmiljön i närområdet. Vid Sydvästlänken förekom också vissa problem med fyllning av bentonit i skyddsroren. Borrningen kunde inte utföras idealiskt utan lokala höjdpunkter förekom där fickor med luft förekom.

I Figur 13 och Figur 14 visas exempel på temperaturutvecklingen för ledaren med och utan artificiell kylning. Kylningen antas här ske med kylmaskin/värmepump men kan också ske med hjälp av så kallad frikyla. Det senare är att föredra ur driftsynpunkt. Ledartemperaturen minskas i exemplen med ungefär 20-40°C beroende på kyleffekt och konfiguration kylslangar.

Kylning via frikyla (passiv kylning) kräver endast en cirkulationspump (dubblad för hög driftsäkerhet), strömförsörjning till pumpen samt övervakning av tryck i systemet och drift av pumpen. Strömförsörjningen kan ske med hjälp av solceller och batteri om tillgång till nätansluten el inte finns tillgänglig. Drift kan läggas ut på entreprenad. Skulle driftstopp uppstå så sker temperaturökningen på kabeln förhållandevis långsamt vilket påverkar insatstiden.



**Figur 13. Vänster: Temperaturrespons vid standardfall: Kabel aluminium, 2010 mm<sup>2</sup>, djup:1.2 m, cc: 0.4-1.0-0.4 m. Resistivitet kabelsand: 1 m·K/W, resistivitet fyllnadsjord: 2 m·K/W. Högsta temperatur uppnådd: 65.9°C. Stationära förhållanden. Höger: Effektagivning (W/m) från kabel vid olika temperatur.**



**Figur 14. Temperaturrespons för standardfall enligt Figur 13 vid artificiell kylning. Kylningen består av PEM 40 mm (väggjocklek 2.4mm, PN6) med vatten som kylmedium och har samma kylande effekt per m som kablarna har värmande effekt. Vänster: en kylslang 10 cm under respektive kabel ger maxtemperatur 26.7°C. Höger: En kylslang mellan respektive kabelpar (halva kyleffekten) ger maxtemperatur 44.2°C.**



### 2.3.6 Andra åtgärder

Exempel på andra åtgärder:

- För att säkerställa att en viss högsta termisk resistivitet underskrids är det möjligt att blanda in liten andel cement i kabelsanden, s.k. weak-mix. Detta ger en förbättrad kornkontakt vid torrt tillstånd.
- Utnyttja tidsskalan. Kanske främst är aktuellt vid varierad last på kabeln, t.ex. från vindkraftsparker mm.
- Andra typer av kabelsand, t.ex. grafit, som ger lägre termisk resistivitet
- Åtgärder som minskar effekt av låga grundvattennivåer

Den sistnämnda punkten avser möjligheten att lägga in ett membran som bryter vattenkontakten mellan grundvattenytan och kabelsanden. Därmed skulle hög termisk resistivitet orsakat av dränerande effekter av låga grundvattennivåer teoretiskt kunna undvikas i kabelsanden. Baksidan är dock att även tillförsel av vatten kan komma denna väg vid naturliga torrperioder varför detta behöver undersökas under kontrollerade förhållanden innan det prövas, se rekommendationer under avsnitt 6.2. För förståelse av de vattentransporterande processer som förekommer rekommenderas t.ex. en tidigare rapport i denna serie, Sundberg (2015).

## 3 Förslag till dimensioneringsfilosofi

### 3.1 Nuvarande "konservativ"

Den dimensioneringsfilosofi som tillämpas inom Svenska kraftnät betecknas som konservativ. Avsikten är således att använda konservativa egenskaper för de ingående komponenter som påverkar kabelns dimensionering. En konservativ dimensionering innebär en överdimensionering gentemot rådande temperaturkrav. Denna innebär i sin tur lägre resistiva förluster och en möjlighet att senare höja den överförda effekten. En konservativ dimensionering har dock alltid en fördel i förlusterna blir lägre vilket ger lägre operativa kostnader, OPEX (Operating expenditures/Operating expenses).

#### 3.1.1 Erfarenheter från Sydvästlänken

Som erfarenhetsåterföringen från Sydvästlänken visar genomfördes inte en konservativ dimensionering konsekvent i praktiken. Markens termiska egenskaper varierade påtagligt efter kabelns sträckning och kabeln dimensionerades inte konservativt. En hög termisk resistivitet valdes men som inte utgjordes av något extremvärde. Orsaken finns att söka i att ett konservativt förfarande skulle få stora konsekvenser för projekterad lösning. Istället angavs i projekteringsdirektivet att aktiv design skulle genomföras där risk förelåg för att projekterad lösningen inte skulle klara temperaturkravet. Detta hade dock byggorganisationen svårt att hantera i byggskedet. Troligen hade det krävts ett bättre geotermiskt underlag och förberedda tekniska lösningar liknande de i den metodik för termisk dimensionering som föreslås i avsnitt 4.

Följden har istället blivit en dimensionering med okänd säkerhet. Troligen är kabeln överdimensionerad till överväldigande del av sträckningen men också risk för underdimensionering föreligger, speciellt vid 2010 mm<sup>2</sup> kabel och Typ B jord. Eftersom dimensionering varit konservativ avseende t.ex. kabel och lastfördelning kan detta uppväga en icke konservativ dimensionering avseende markens egenskaper. Det kommer dock att ta tid att få belägg för detta eftersom tidsskalan innan maximal temperatur uppnås är i storleksordningen 10 år.

### 3.2 Riskbaserad (sannolikhetsbaserad)

Vid dimensionering av konstruktioner (broar, hus, geokonstruktioner etc) används Eurokods systemet. Det innebär i korthet att bärverk utsätts för laster som ger en lasteffekt på detsamma. Bärverkets förmåga att stå emot laster kallas bärförmåga. För att bärverket inte skall kollapsa måste bärförmågan vara större än lasteffekten. Om gränstillståndet överskrids uppfyller inte bärverket dimensioneringskriteriet. Man skiljer på brottgränstillstånd, som är förenat med kollaps, och bruksgränstillstånd som, om det överskrids, innebär att funktionen påverkas. För att hantera osäkerheter i lasteffekter och bärförmåga inklusive modeller, material och metoder används partialkoefficienter, en form av säkerhetsfaktorer, som även tar hänsyn till den marginal man önskar i systemet. Partialkoefficienterna ska beakta sannolikheten för ogynnsamma avvikelser från karaktäristiska värden. Reduktionsfaktorer tar hänsyn till att flera laster eller egenskaper inträffar eller kan verka samtidigt, d.v.s. tidsförloppet.

I analogi med detta kan man för kabeldimensionering likna last med ström och lasteffekt med resistivt genererad värmeeffekt. Bärförmågan motsvarar kabelns förmåga att uppfylla gränstillstånd, d.v.s. klara resulterande temperatur, isolerande förmåga etc. under sin tekniska livslängd. Brottgränstillståndet innebär gräns för att termisk kollaps av kabeln inte skall ske (Thermal runaway), och bruksgränstillstånd kan liknas med att temperaturen överskrider dimensionerande värde för viss tid som kan medföra kortare livslängd. Detta senare är något man antingen accepterar eller åtgärdar genom att sänka storleken på överförd ström under motsvarande tid. Reduktionsfaktorer borde kunna tillämpas på sannolikheten för att maximal marktemperatur sammanfaller i tiden med maximal termisk resistivitet i mark och i kabelsand samt med maximal last. I brottgränstillståndet räknar man med karakteristiska värden, vilken tar hänsyn till spridningen av egenskaperna emedan man vid beräkningar i bruksgräns räknar med de mest sannolika/representativa värdena på egenskaperna.

Med partialkoefficientssystemet tar man hänsyn till sannolikheten för en händelse, dock på ett lite fyrkantigt sätt. Det bakomliggande systemet utgörs av ett riskbaserat system där man bättre tar hänsyn till sannolikheten för händelser och konsekvensen för dessa. Ett sådant system skulle också kunna tillämpas på hela kabeldimensioneringen men kräver då ett internationellt utvecklingsarbete. Ett sådant samarbete krävs dock inte för att förändra dimensioneringsprincipen för marks termiska egenskaper.

### 3.2.1 Observationsmetoden

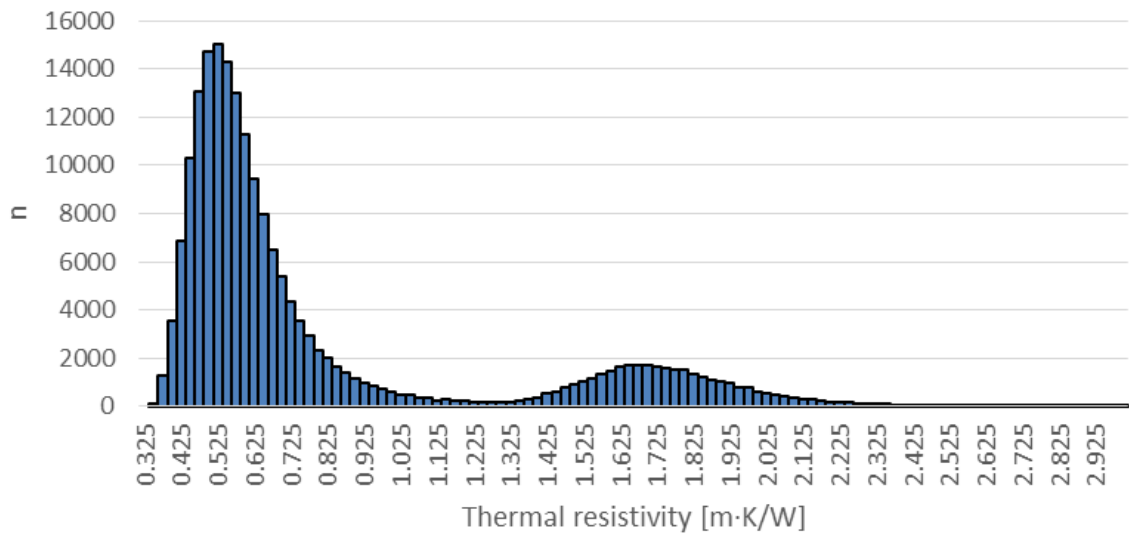
Eurokodsystelet skulle kunna tillämpas på den delmängd av dimensioneringen som har störst variation i egenskaper, nämligen dimensioneringen för omgivande marks termiska resistivitet. Observationsmetoden har utvecklats för att hantera osäkerheter i egenskaper, vilka observeras/mäts under själva byggandet, och beräkningsmodellerna. Metoden gör det möjligt att hantera utförandet utifrån information om markens termiska egenskaper som kommer fram under byggandet. Detta beskrivs närmare i avsnitt 3.3 och 4.

## 3.3 Sannolikhetsbaserad dimensionering för omgivande mark

### 3.3.1 Osäkerheter i omgivande marks egenskaper

Eftersom de största osäkerheterna finns i omgivande marks termiska egenskaper har också förslaget inriktats mot detta område.

I förslaget till strategi för termisk modellering beskrivs metodiken för upprättande av en geotermisk modell för en kabelsträcka. Denna leder till att den termiska resistiviteten för kabelsträckningen modelleras. Resultatet beskriver en fördelning av termisk resistivitet, se Figur 15. Denna är proportionell mot ledningssträckningen så att t.ex. 5 percentilen motsvarar 5 % av sträckningens längd.



**Figur 15** Modellerad termisk resistivitet för Sydvästlänken, se Bilaga 2. Fördelningen är proportionell mot Sydvästlänkens längd. Fördelningen är bimodal beroende på jordartsfördelningen och dess egenskaper efter sträckningen. Modelleringen är utförd på ett förenklat sätt. Den skeva fördelningen beror i viss mån av B-jord men i huvudsak av stort inslag av torv med hög termisk resistivitet.

Vid nuvarande dimensioneringsfilosofi så dimensioneras kabeln (lastfördelning, kabelarea, ledarmaterial och varierat centrumavstånd) i aktuell omgivning så att kabeln inte överskrider dimensionerande temperatur (absolut temperaturkrav). Eftersom övertemperaturer kan uppstå i 1-5 m:s skala så innebär detta att dimensioneringen skall göras för extremt hög percentil av egenskapernas fördelning, kanske 99.999 percentilen.

Att dimensionera för en hög termisk resistivitet har en rad olägenheter:

- Svårt att fastställa värdet för den termiska resistiviteten vid den höga percentilen eftersom fördelningen blir extremt osäker. Därtill tillkommer osäkerheter kring vad som händer vid hög temperatur. Följden kan bli att man använder resistivitet för torrt tillstånd för jordarter som har förutsättningar att erhålla mycket låg vattenhalt. Detta är konservativt men ett rimligt synsätt under givna antaganden.
- Sannolikt blir en mycket stor del av kabeln kraftigt överdimensionerad (vid användande av en och samma kabeltyp) och att endast en mycket liten del har förutsättningar för att uppnå dimensionerande temperatur.
- Större ledararea ger betydligt fler kopplingspunkter, som kan vara den svagaste punkten och påverka underhållsbehovet.
- Ojämn temperaturfördelning på kabeln.

En ojämn temperaturfördelning i sin tur är olycklig av följande orsaker:

- Trots att en mycket stor del av kabeln har en temperatur som är betydligt lägre än dimensionerande temperatur så kan inte full nytta erhållas av detta
  - Kabelns åldrande, som till stor del är temperaturrelaterad, blir ojämn. Vid tidpunkt för utbyte har således betydande delar av kabeln en kvarvarande livstid.
- Möjlighet till uppgradering av kabelns effekt blir svårare att genomföra (gäller främst AC-kabel).

Genom att öka antalet verktyg i verktygslådan för ingenjörsmässiga lösningar kan en mer optimerad lösning med en klenare kabel erhållas.

### 3.3.2 Förslag till dimensioneringsprinciper

Förslaget innebär i korthet följande:

- Kabel dimensioneras för en lägre percentil av den termiska resistiviteten i marken, kanske 60-95 percentilen beroende på de aktuella förhållandena.
  - Aktuella förhållanden kan utgöras av egenskapsfördelningens utseende och hur den är uppbyggd
  - Valet av kabeln i sig påverkar vilken percentil som väljs utifrån rådande marknadsförhållanden
- För termisk resistivitet över 60-95 percentilen utförs ingenjörsmässiga åtgärder som leder till lägre temperatur enligt avsnitt 2.3. Bestämning av ett dimensionerande värde vid en lägre percentil kommer att vara betydligt säkrare än ett värde långt ut i fördelningens svans.
- Reduktionsfaktorer borde kunna tillämpas på sannolikheten för att maximal marktemperatur sammanfaller i tiden med maximal termisk resistivitet i mark och i kabelsand samt maximal last.

Om den termiska resistiviteten efter sträcka viktas eller modelleras mot sträckningen längd så kommer fördelningen att vara proportionell mot kabelns längd. T.ex. 5 percentilen representerar då 5 % av sträckningens längd. Observera att förutom fördelningen av naturliga egenskaper finns också t.ex. korsningspunkter som kan vara dimensionerande.

I Figur 15 visas den modellerade fördelningen av termisk resistivitet för Sydvästlänken. Resistiviteten för t.ex. 95 percentilen av fördelningen är  $1.85 \text{ m}\cdot\text{K}/\text{W}$  medan 75 percentilen motsvarar  $0.78 \text{ m}\cdot\text{K}/\text{W}$  (vilket också ungefär råkar sammanfalla med medelvärdet). Fördelningar för respektive jordtyp samt termisk resistivitet för olika percentiler beskrivs i Bilaga 2.

## 4 Förslag till metodik för termisk dimensionering

### 4.1 Inledning

Vid Sydvästlänken medförde de termiska förhållandena efter sträckningen att kabeln uppgraderades i flera steg. Vid byggandet användes slutligen två kabeltyper och ca 74 dimensioneringsfall. Detta tillsammans resulterade i följande:

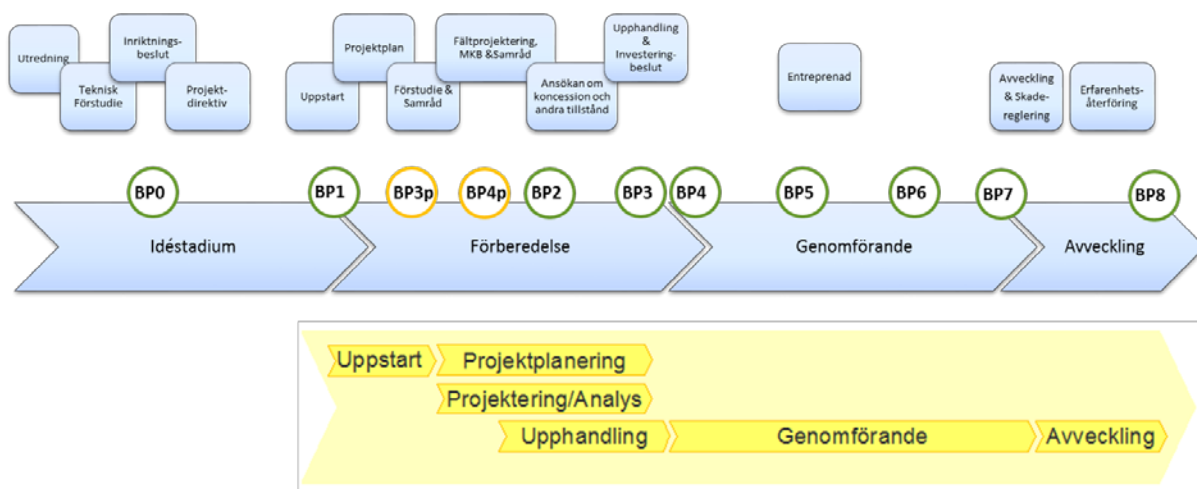
- Komplex byggnation
- Tidspress under projekteringen med vissa brister som följd
- Stor byggplatsorganisation
- Många skarvpunkter
- Ökade kostnader för både kabel och installation samt kringkostnader
- Kvarstående osäkerhet om dimensioneringen vid främst 210 mm<sup>2</sup> kabel i kombination med Typ B jord, samt vid organisk jord

Att byggnationen ändå kunde genomföras på ett i huvudsak lyckat sätt beror delvis på att ribban lades förhållandevis högt avseende geunderlagets kvalitet.

Genom en utvecklad strategi för termisk dimensionering så bedöms processen ha kunnat genomföras till en såväl lägre kostnad som en lägre risk. Ett förslag till utvecklad strategi för projekterings-, anläggnings- och driftsfas redogörs för i de följande avsnitten.

### 4.2 Planerings- och byggprocessen

Den övergripande planerings- och byggprocessen för ett kabelprojekt följer Svenska kraftnäts projektmodell, se Figur 16. Planering, projektering och analys sker före investeringsbeslutet varefter genomförandet påbörjas.



Figur 16 Svenska Kraftnäts projektmodell.

I speciellt större kabelprojekt följs inte alltid den ideala processen enligt Figur 16. För t.ex. Sydvästlänken omfattade projekteringen före investeringsbeslut enbart kabelprojekteringen. Mark- och schaktarbeten projekterades betydligt senare och hade ett separat investeringsbeslut. Detta ledde till att man hade ett dåligt underlag beträffande markens termiska resistivitet vid tidpunkten för kabelns dimensionering.

Anledningen till detta är att man hade långa ledtider för kabeltillverkningen medan upphandling av schaktarbeten hade förhållandevis kort förberedelsetid. Genom att man hade två investeringsbeslut harmoniserade inte tidplanerna för kabel och schakt fullt ut vilket skapade problem.

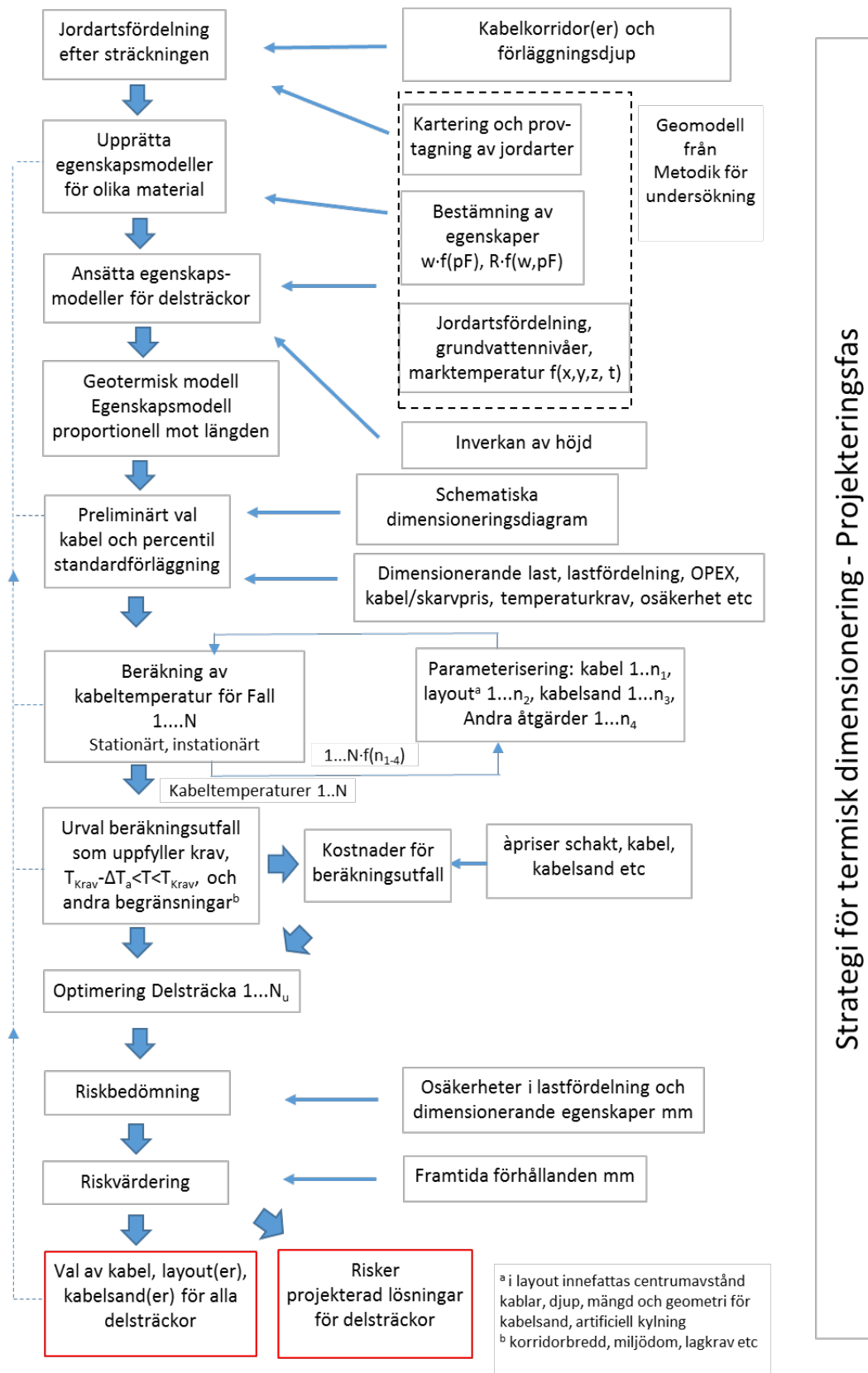
Projektmodellen enligt Figur 16 är i huvudsak bra. Det är väsentligt att markprojektering görs i anslutning till kabelprojekteringen. En fullständig markprojektering behöver kanske inte genomföras innan investeringsbeslut tagits, eftersom den är förhållandevis omfattande och kostsam. Den måste dock i ett tidigt skede drivas så långt att tillräckligt underlag erhålls för såväl kabelprojektering, tillståndsprocess och markförhandling. En omfattning av de termiska undersökningarna inför kabeldimensioneringen, enligt den metodik som beskrivits i Bilaga 1, rekommenderas.

#### 4.3 Projekteringsfas

Förslaget på strategi för projekteringsfasen framgår av Figur 17. I anslutning till projekteringsfasen tas en geomodell fram som utvecklas i flera steg, från en översiktlig nivå (se föregående avsnitt) till en detaljerad nivå. Denna beskrivs närmare i Bilaga 1. I korthet innehåller geomodellen följande:

- Jordarternas fördelning efter sträckningen
- Förväntade grundvattenförhållanden efter sträckningen
- Termiska egenskaper för olika jordarter vid dimensionerande grundvattenförhållanden
- Förväntad marktemperatur efter sträckningen

Baserat på geomodellen upprättas en geotermisk modell, med en termisk resistivitetsfördelning som är proportionell mot sträckning. Det innebär att egenskapsmodeller för olika material ansätts för delsträckor med respektive material och viktas mot längden av delsträckan i förhållande till den totala längdsträckningen för kabeln. Alla jordarter undersöks men fokus läggs mot de som förväntas vara dimensionerande för sträckningen. Resultatet blir en egenskapsmodell för hela sträckningen, se exempel i Figur 15. Närmare beskrivning finns i Bilaga 1.



Figur 17 Strategi för termisk dimensionering – Projekteringsfas. I figuren antyds att flera itereringar kan genomföras med ökande underlag avseende egenskaper mm.



Baserat på denna fördelning kan ett största dimensionerande värde för termisk resistivitet i omkringliggande mark utvärderas med en acceptabel risk. Eftersom det är ett extremvärde i den yttersta svansen av alla termiska resistiviteter, kommer detta värde att vara högt.

Efter orienterande beräkningar av kabeltemperatur väljs en kabel och ett första mål sätts upp (startvärde) för vilken percentil i fördelningen av termisk resistivitet i kringliggande jord av kabelns längdsträckning som en standardförläggning bör klara. Med standardförläggning avses sådan i grävd schakt samt vid borrhål förläggning. För resterande del av sträckan utförs ingenjörsmässiga åtgärder. Olika delsträckor kommer därmed att få varierande ingenjörsmässiga lösningar. Antalet typfall hålls dock ned eftersom en större komplexitet i installationen medför merkostnader i produktionsledet. Exempel på ingenjörsmässiga åtgärder är:

- Avstånd mellan kablar
- Layout och mängd/typ kabelsand
- Aktiv kylning

Därefter optimeras ingenjörsmässiga lösningar mot kostnader. Efter riskanalys och värdering av resultatet kan förnyade beräkningar utföras i en iterativ process med reviderat val av kabel, reviderad percentil av längdsträckningen som en standardförläggning bör klara etc.

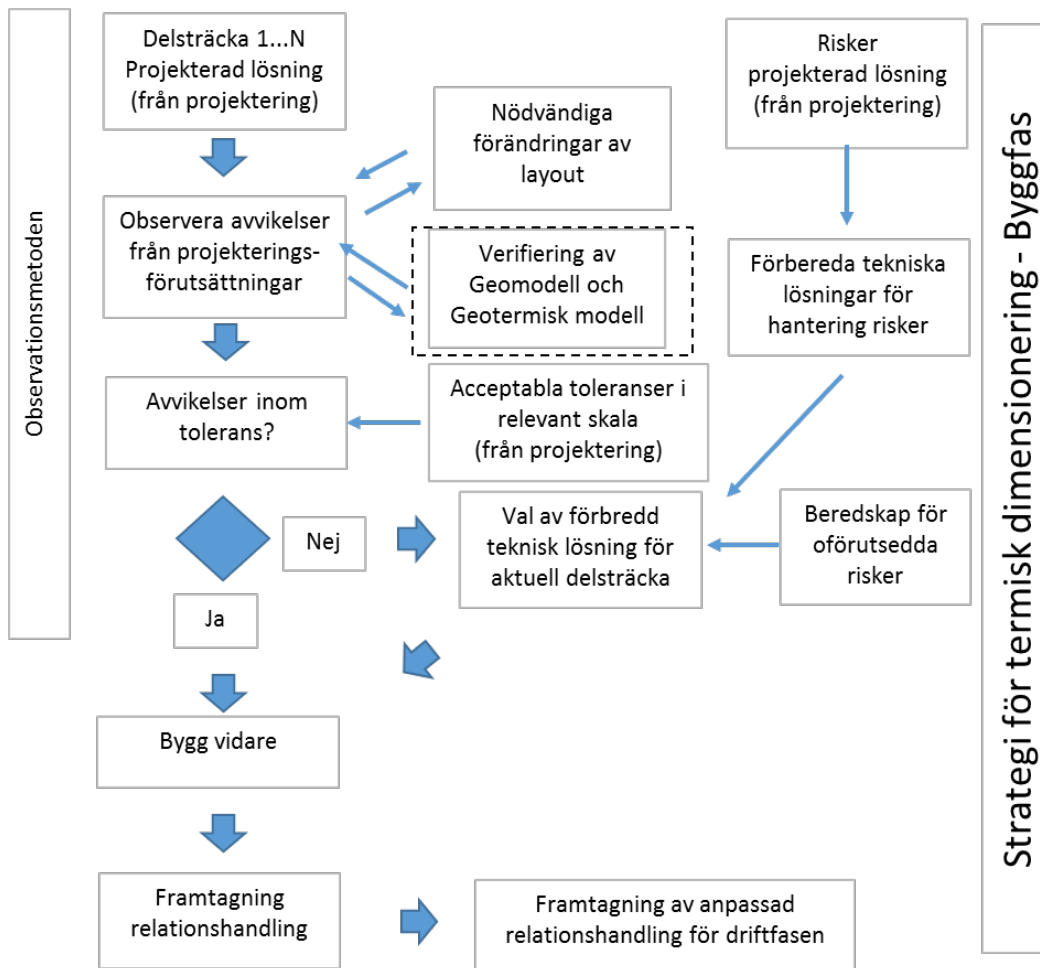
Efter denna procedur har kabel valts och layout och ingenjörsmässiga lösningar för de olika delsträckorna har valts och dimensionerats. Rimligen bör resultatet bli att percentilen för det dimensionerande värdet av resistivitetsfördelningen för en standardförläggning ligger kring exempelvis 70 percentilen istället för det ursprungliga dimensionerande värdet från ett extremvärde i fördelningens svans (kanske 99.999 percentilen). I boxen "Risker" finns angivet vilka egenskaper som skall observeras med observationsmetoden i byggfasen. Riskerna utgör också underlaget för förberedda tekniska lösningar.

Ett exempel på hur olika tekniska lösningar är fördelade efter optimering skulle kunna vara enligt nedan:

- 70 % av sträckningen: standardförläggning
- 25 % av sträckningen: ökat cc-avstånd mellan kablar
- 4 % av sträckningen: förändrad layout för och typ av kabelsand
- 1 % av sträckningen: aktiv kylning med frikyla

## 4.4 Byggfas

Förslaget på strategi för byggfasen framgår av Figur 18.



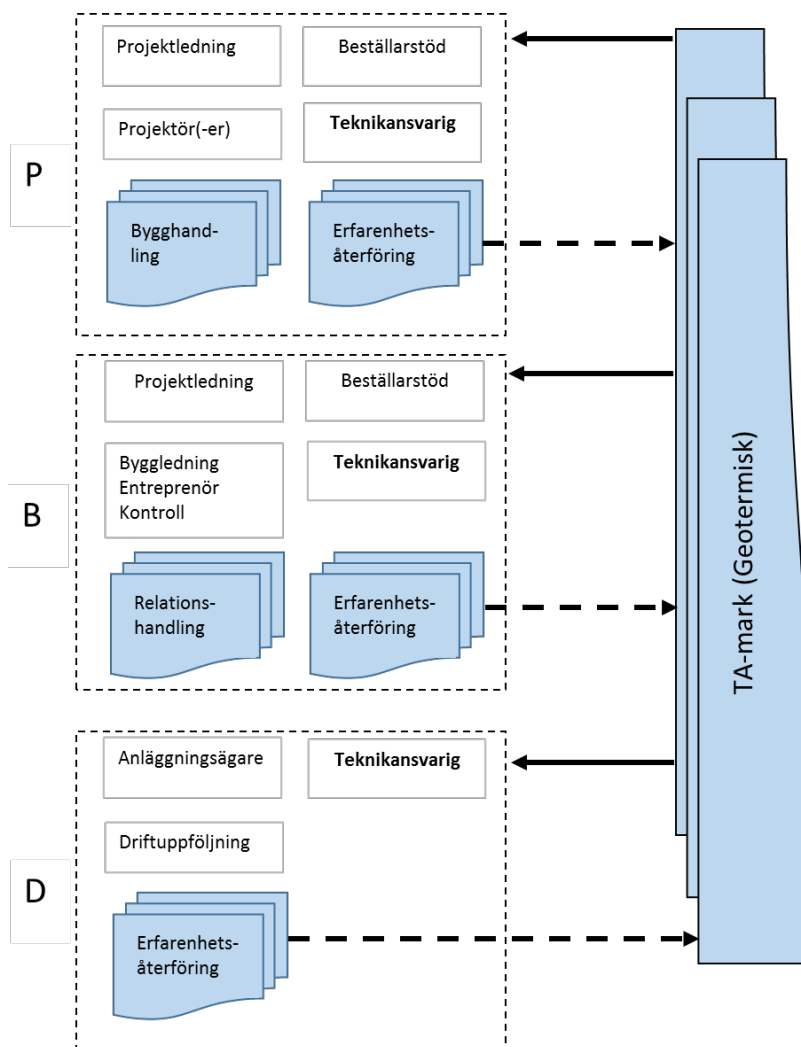
Figur 18 Strategi för termisk dimensionering – Byggfas

Under byggfasen används observationsmetoden som beskrivits kort under avsnitt 3.2.1. Från projekteringsfasen finns projekterade lösningar för de olika delsträckorna. Under byggandet observeras eventuella avvikelser i specifikt angivna egenskaper från projekteringsförutsättningarna med hjälp av observationsmetoden. Dessa avvikelser kan vara nödvändiga förändringar av layout relaterat till t.ex. fysiska förhållande som uppkommer under byggandet eller att de termiska förhållandena (eller relaterade egenskaper) i marken avviker från de projekterade vilket påverkar layout. Om avvikelserna håller sig inom angivna toleranser för layouten så bygger man vidare. Om så inte är fallet väljs en förberedd teknisk lösning för det aktuella fallet. Dessa tekniska lösningar har framtagits från den riskanalys som utförts i projekteringsens slutskede. Beredskap finns också för oförutsedda risker.

Utöver normala relationshandlingar, tas också en anpassad relationshandling fram för driften, innehållande förväntade termiska egenskaper efter sträckning och andra relevanta förhållanden.

## 4.5 Organisation och dokumentflöde

Förslaget för organisation och dokumentflöde framgår av Figur 19.



Figur 19 Organisation och dokumentstruktur för projekterings-, bygg- och driftsfas

Ett viktigt styrande dokument är TA-mark, som innehåller tekniska anvisningar för såväl projekterings-, bygg- och driftsfas av den termiska dimensioneringen och kunskapsåterföringen (geotermisk TA-mark). Anvisningar skall också finnas hur den tekniska dokumentationen skall beskrivas. Förutom sedvanlig dokumentation från respektive fas så skall ett avsnitt i erfarenhetsåterföringen vara direkt kopplat till geotermisk TA-mark med förbättringsförslag. Relationshandlingarna bör kompletteras med en speciell information som är avsedd för driftsfasen. Här beskrivs punkter som kan vara väsentliga för driften. T.ex. kan man på ett förenklat sätt beskriva var det finns särskild anledning att följa upp temperaturutvecklingen på kabeln för att få erfarenheter av ett specifikt dimensionerings- eller åtgärdsfall. Ett annat exempel kan vara sträckningar som är känsliga för grundvattensänkningar.

I erfarenhetsåterföringen från Sydvästlänken (Lidén & Sundberg, 2015) framhålls vikten att ha en ansvarig person som garanterar att termiska frågor blir en del av hela processen. I organisationsstrukturen kallas denna person (geotermiskt) Teknikansvarig och skall ha såväl ansvar som mandat inom projektet. Den geotermiskt teknikansvariges främsta hjälpmedel blir TA-mark och skall också ansvara för att denna uppdateras.

I Byggorganisationen så utgör kontrollen en central roll. Kontrollanten måste ha kunskap och förståelse för de geotermiska och geohydrologiska förhållandena som kan uppstå och skall kontrolleras samt vidare om de toleranser som skall innehållas enligt observationsmetoden. Kontrollanten samverkar med den geotermiskt teknikansvarig. Kontrollanten skall påtala om och hur de aktuella toleranserna innehålls för varje delsträckning.

Kontrollanten skall vidare kontrollera att rätt åtgärd förbereds om toleranserna inte innehålls och att denna dokumenteras på avsett sätt. Om ingen färdig lösning finns tillgänglig skall rådgivning ske med den geotermiskt teknikansvarige och vid behov med beställarstöd. Kontrollen sker i färdig schakt. Detta innebär med nödvändighet att schakten måste färdigställas i så god tid att kontrollen hinner utföras och att eventuella tekniska åtgärder hinner förberedas. Kontrollantens ansvar och befogenheter måste tydliggöras inom organisationen.

Under driftfasen är geotermisk TA-mark inriktad mot fortlöpande kontroll av temperaturutvecklingen och hur den är relaterad till projekteringen.

## 5 Kostnader

Kostnaderna för olika moment är väsentliga för att en optimering mellan olika åtgärder skall kunna ske, t.ex. optimering mellan ökad dimension på kabel och ingenjörsmässiga åtgärder.

Nedan anges kostnaderna för kabel och schakt för Sydvästlänken. Kabel- och skarv-kostnader är större men i samma storleksordning som kostnaderna för mark- och schaktentreprenad.

| Sydvästlänken Kabel- och Schakt projektet -<br>kostnad per km |     | tkr       | tkr/km   |
|---|-----|-----------|----------|
|   | km  | P2/aug14  | P2/aug14 |
| Mark & Schakt entreprenad (inkl oförutsett/ÄTA)               | 192 | 1 147 500 | 5 977    |
| Kabel inkl skarv, förläggning (inkl oförutsett/ÄTA)           | 192 | 1 355 000 | 7 057    |

För att kunna optimera behövs emellertid en nedbrytning av kostnaderna. Detta kan vara förenat med en hel del arbete men framtagning av nyckeltal rekommenderas för att möjliggöra en bättre totalekonomi.

Exempel på nedbrytning av kostnader för Sydvästlänken skulle kunna vara i följande delar:

1. Totalkostnad för kabelprojektet
  - a. Kostnad kabelinstallation inklusive schakt, skarv etc
    - i. Platsorganisation
    - ii. Schakt och återfyllnad. kr/m<sup>3</sup>
    - iii. Kabelsand, kr/m<sup>3</sup>
      1. Kabelbädd,
      2. kringfyllning
    - iv. Borrard förläggning, kr/lm
    - v. Kabel, kr/lm
      1. 2010 mm<sup>2</sup>
      2. 2590 mm<sup>2</sup>
    - vi. Kabelinstallation, inkl skarv, kr/lm
      1. Schakt
      2. Borrard
        - a. bentonitfyllning

## 6 Slutsatser och rekommendationer

### 6.1 Slutsatser

#### *Övergripande slutsatser*

Föreslagen strategi till termisk dimensionering ger:

- en systematiskt och transparent projektering med möjlighet till korrigerande åtgärder under byggtiden och tillgodogörande av driftserfarenheter
- mindre komplexitet (jämfört med SV-länken) vilket i sin tur ger betydande besparingar och mindre risker under projektering och byggande
- en jämnare temperaturfördelning efter kabelns längd vilket påverkar livslängd, kan medföra mindre kabeldimension eller möjlighet till framtida effekthöjningar
- möjlighet till en kompaktare förläggning av kabel (reducerade kostnader, mindre miljöpåverkan, enklare tillstånd och markåtkomst)

#### *Dimensioneringsfilosofi och kostnader*

- Tillämpning av en konservativ dimensioneringsfilosofi innebär att en stor del av sträckningen är överdimensionerad men utan möjlighet till framtida effekthöjning på grund av lokala flaskhalsar. En större kabeldimension medför dock alltid lägre operativa kostnader.
- Genom att tillämpa en sannolikhetsbaserad dimensioneringsfilosofi avseende omgivande mark tillsammans med observationsmetoden under byggande bedöms kostnader kunna sparas
- Genom att utföra ingenjörsmässiga åtgärder i partier där kabeltemperaturen annars skulle vara hög kan en mindre kabeldimension generellt användas för hela sträckningen.

#### *Projektering och byggande*

- En geotermisk egenskapsmodell tas fram och ett standardfall används för en stor del av kabelsträckningen. För resterande delar utförs ingenjörsmässiga åtgärder som exemplifierats med dimensioneringsdiagram.
- Observationsmetoden används under byggandet och gör det möjligt att hantera utförandet utifrån information om markens termiska egenskaper som kommer fram i byggandet. Om resultat av kontrollen avviker från acceptabel tolerans används förberedd teknisk lösning.

#### *Anvisningar och organisation*

- Tekniska anvisningar behövs för att implementera och förfina den termiska dimensioneringsstrategin (geotermisk TA-mark)
- En person med ansvar för de termiska frågorna är nödvändig för att säkerställa att dimensioneringen blir korrekt, optimeras och att kunskap återförs. Därutöver krävs att kontrollen avpassas till observationsmetoden

## 6.2 Rekommendationer

### *Strategi*

Det rekommenderas att:

- Påbörja framtagandet av ett styrande dokument, tekniska anvisningar, i avsikt att implementera och förfina den termiska dimensioneringsstrategin (geotermisk TA-mark)
- Införliva en geotermiskt Teknikansvarig i såväl SVKs organisation som projektorganisationerna
- Höja kunskapsnivån kring termisk dimensionering hos projektledare och kontrollanter genom seminarier och andra utbildningsinsatser
- Relationshandlingar avseende utförda entreprenader inte enbart omfattar vad som är nedlagt i mark utan även vilka termiska egenskaper marken kring ledningspaketet har längs sträckan. Detta för att underlätta uppföljning under drift
- Utveckla rutiner för hantering av termiska frågeställningar i anslutning till omgivningsförändring under drift, såsom frågor/remisser avseende planärenden, schakt, grundvattensänkningar etc
- Tillämpa punkterna ovan i ett pilotprojekt som ett led i utvecklingsarbetet av förändrad termisk dimensionering inom projektering, bygg och drift. Kan med fördel kopplas till rekommendationen ”Höja kunskapsnivå...” ovan
- Påbörja framtagningen av en geotermisk modell i anslutning till kabeldimensioneringen, före investeringsbeslutet. Beslutet om kabel tas tidigt eftersom den har lång produktionstid

### *Forskning och innovation*

För att säkerställa och utveckla dimensioneringsförfarande och dra erfarenheter av Sydvästlänkens drift rekommenderas följande:

- Uppskalning av laboratorieförsök. Laboratorieexperimentet visar bl.a. på förbättrade termiska egenskaper vid hög temperatur. En uppskalning av experimentet behövs för att bekräfta dessa slutsatser (pilotskala i klimatrum eller i fält)
- Utveckla och testa metoder för kompakt förläggning såsom frikyla och effektiv applicering av kabelsand. Görs med fördel i ett pilotprojekt enligt ovan.
- Utvärdering av temperaturmätningar med befintlig DTS-installation (Distributed Temperature Sensing). Slutliga stationära förhållande nås inte förrän efter ca10 år. Genom kontinuerlig uppföljning och värdering mot förväntade egenskaper kan slutsatser dras betydligt tidigare och erfarenheterna integreras i geotermisk TA-mark och inom nya projekt.

## Referenser

Lidén P & Sundberg J, 2015. South West Link - Feedback of experience from thermal design. Report 2016:6, Department of Civil and Environmental Engineering, Division of GeoEngineering, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden.

Lidén P, Sundberg J & Lilliestierna A, 2016. High temperature performance for high voltage underground cables in cable sand. Laboratory experiment. Report 2016:7, Department of Civil and Environmental Engineering, Division of GeoEngineering, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden.

Lilliestierna A & Utas J, 2015. Thermal classification of cable route. Master's Thesis 2015:40. Department of Civil and Environmental Engineering, Division of GeoEngineering, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden.

Sundberg J, 2012. Termiska egenskaper för mark - Sydvästlänken, Sammanfattning av mätning, beräkning och analys. Rapport för Svenska kraftnät. Vectura 2012-12-17.

Sundberg J, 2015. Evaluation of thermal transfer processes and back-fill material around buried high voltage power cables. Report 2016:5, Department of Civil and Environmental Engineering, Division of GeoEngineering, Chalmers University of Technology Gothenburg, Sweden.



# Bilaga 1

## Undersökningsmetodik för HVDC kabelförläggning

### Termisk klassificering av kabelsträckning – Upprättande av Geomodell och Geotermisk modell Version 2.1

Utförd av: Andreas Lilliestierna och Jan Sundberg, Chalmers

## 1 Bakgrund

### 1.1 Problemställning

Kabelns temperatur beror på den direkta omgivningen i kabelgrav och närmiljö och dimensionerande egenskaper erhålls i skalan 1-5 m. Längre kabelsträckningar dimensioneras således efter egenskaper långt ut i svansarna på fördelningarna för de kritiska parametrarna.

### 1.2 Syfte

Undersökningsmetodiken syftar till att ta fram dimensionerande värden på termisk resistivitet för jordar inför nedgrävning av högspänningskablar. Utifrån utvärderingar av grundvattensituation, jordprover och uppmätt termisk resistivitet ska kritiska punkter identifieras längs med kabelsträckningen och egenskapsmodeller tas fram.

### 1.3 Underlag

Undersökningsmetodiken förutsätter att kabelsträckningen är bestämd, och att en eller flera kabelkorridorer finns att utgå ifrån.

## 2 Samordning

Undersökningar av termiska egenskaper samordnas med andra geotekniska fältundersökningar efter kabelsträckningen.

## 3 Undersökning – upprättande av geomodell

Undersökningen genomförs i tre steg, från en översiktlig nivå till en mer detaljerad nivå där ambitionsnivån är avpassad mot kunskapsbehovet.

### 3.1 Skrivbordsstudie – Steg 1

Steg 1 innebär att med kartmaterial och befintliga data skapa en geomodell över kabelsträckningen.

### 3.1.1 Kartor

Genomför en initial övergripande studie av terräng, geologi och grundvattensituation för att skapa en generell bild av hela sträckan. SGU jordartskarta/bergkarta samt lantmäteriets fastighetskarta och topografiska karta är bra utgångspunkter. Markera ut områden som redan i det här stadiet förväntas bli problemområden, dvs. grova sandar och organiska jordar som torvar, mossar etc.

### 3.1.2 Grundvattenrör/brunnar

Finns det observationsrör för grundvatten i närheten kan dessa användas för att utvärdera grundvattennivåer. Observationsrör med liknande terrängförhållande och klimat som inte ligger nära kabelförläggningen kan nyttjas som referensrör vid jämförelse med t.ex. chalmersmetoden. SGUs *kartvisare grundvattennivå* innehåller observationsrör som kontinuerlig loggas för grundvattennivå av SGU och *brunnsarkivet* innehåller information om brunnar som eventuellt också kan användas för loggning av grundvattennivåer.

### 3.1.3 Tidigare undersökningar

Kontrollera om det är möjligt att erhålla data från undersökningar som har gjorts längs med kabelsträckningen tidigare.

### 3.1.4 Preliminär geomodell

Framställ kartor och beskrivningar i textform över sträckan som kan användas som stöd inför grundligare kartläggning med följande i fokus:

- Jordart och bergdjup utefter sträckningen. Redan i det här skedet kan man göra en bedömning utifrån jordartskartan/bergkartan vilka jordarter och djup till berg som förekommer och kan förväntas.
- Korsning av vägar, diken, vattendrag etc.
- Torvar/mossar
- Grova jordar
- Odlad jord
- Topografi – Lantmäteriets höjdkartor i 2m upplösning.
- Förväntade typiska jordartsprofiler för delområden
- Bedömning av fördelning av termisk resistivitet för respektive material eller grupper av material

### 3.1.5 Redovisning

Gör en sammanställning av den information som har framkommit i skrivbordsstudien och skapa en första geomodell (Geomodell 1) över linjesträckningen (geologiskt/hydrogeologiskt/termiskt) med beskrivande text. Den termiska beskrivningen baseras på bedömda fördelningar av termisk resistivitet för respektive material eller grupper av material, samt på beräknad marktemperatur för kabeldjup.

## 3.2 Översiktligt fältarbete – Steg 2

Steg 2 innefattar bl.a. en enklare kartering av hela linjesträckningen till fots.

### 3.2.1 Linjetäckande kartering

Genom att tidigt genomföra enklare kartering av hela kabelsträckningen kan en bättre bedömning göras av vilka undersökningar som kommer behövas. Verifiering av terräng och jordprofiler utifrån Geomodell 1.

Utgå från jordartskartorna och kontrollera jordarten utifrån terrängens karaktär (moränblock, växtlighet, formationer etc.). Undersök sträckan med jordspjut längs hela sträckan. Var 50e meter i homogena områden och var 10e meter i heterogena områden och vid förväntade övergångar mellan jordartsområden så att dessa kan verifieras (jordspjut ger information på ca 0.5 m djup). Detta kommer vara utgångspunkten för var jordprover tas i nästa steg. Gör även en uppskattning av om jorden var torr, fuktig eller blöt och om jordarten vid ytan avviker från den på 0.5 m djup. Provgropar kan behövas i vissa fall.

Kontrollera även att vägar, vattendrag, mossar osv. är på sin plats enligt Geomodell 1. Notera deviationer. Gör vidare en bedömning av grundvattennivåer utifrån vad omgivningen kan avslöja. Leta specifikt efter stående vatten, vattendrag fuktig/torr mark etc.

I det här stadiet är det också läge göra utsättning för grundvattenrör. Installation av dessa sker sedan i det detaljerade fältarbetet.

### 3.2.2 Redovisning

Notera alla deviationer från Geomodell 1 och framställ ett uppdaterat dokument över jordarter och grundvattensituation i form av en reviderad och förfinad geomodell med beskrivande text, Geomodell 2.

## 3.3 Detaljerat fältarbete – Steg 3

När en grov uppskattning av jordarterna och grundvattennivåer längs hela sträckan har gjorts är det dags att genomföra ett mer utförligt fältarbete. Det innefattar framförallt för respektive jordartstyp att införskaffa ostörda jordprover, mäta termisk resistivitet och installera grundvattenrör samt mätning av nivåer i dessa.

### 3.3.1 Provtagning och mätning av termisk resistivitet

Upptagning av ostörda jordprov samt mätningar av resistivitet och ostörd marktemperatur på följande nivåer:

- Kabeldjup
- Halva kabeldjupet
- Ytjord

Därutöver görs fältanteckningar av förhållande på platsen, t.ex. nivå för synlig grundvattennivå i groparna eller i dess närhet (t.ex. vattenförande dike, bäck eller sjö).

Provgroparna grävs omedelbart före mätningarna för att inte påverka dessa termiskt.

Vid längre homogena formationer kan längre avstånd mellan provgropar accepteras. Heterogena passager kan med fördel grävas ut tätare om dimensionerande värden kan förväntas. Områden med mycket organiskt material och grova jordarter (framförallt sandiga och grusiga jordar med små mängder finkornig materia) bör prioriteras då dessa sannolikt är dimensionerande. För att få en representativ fördelning måste dock alla jordarter provtas i viss omfattning. I torvmossar och liknande nyttjas långa sonder för resistivitmätning eftersom dessa områden lämpar sig sämre för utgrävning och är förhållandevis lätta att penetrera med större sonder. Med sond fås också en ostörd temperaturprofil. Organiska jordarter måste indelas med avseende på vattenhållande förmåga för de delar av sträckningen där delar av torven befinner sig över grundvattenytan.

### 3.3.2 Mätning av temperaturprofil

För att verifiera uppmätta och beräknade temperaturer installeras en eller flera temperaturprofiler på lämpliga platser i öppen terräng.

### 3.3.3 Grundvattenrör

Desto tidigare installation av grundvattenrör, desto mer pålitliga grundvattenprognoser. Kan en sådan här undersökning ske något år/flera år innan kabelförläggning så är det jättebra. Tumregeln är ”så tidigt som praktiskt möjligt”. Kan detta bara göras under kortare tid föreslås den förväntat torraste perioden på året (vanligtvis under hösten) och under minst 3 månader. För att undvika osäkerheter med manuella grundvattenmätningar föreslås automatiska loggrar.

### 3.3.4 Laboratorieundersökningar

Ett representativt urval av jordproverna mäts termisk resistivitet i laboratoriemiljö vid följande dränerande undertryck (pF):

- pF1 (0.1 m undertryck)
- pF2 (1 m undertryck)
- pF3 (10 m undertryck)

Därutöver mäts även termisk resistivitet vid naturlig vattenhalt och i torrt tillstånd. Rutinanalys av densitet, vattenhalt och jordart utförs. På ett urval prover bestäms kornstorleksfördelning. Antalet prover för t.ex. termisk resistivitet beror av sträckningen längd och områdets heterogenitet i längs- och höjddled. Metoden för bestämning av termisk resistivitet skall vara standardiserad.

### 3.3.5 Redovisning

Notera ytterligare deviationer från Geomodell 2 och framställ ett uppdaterat dokument som nu också innehåller mätdata från fält och laboratorium i form av Geomodell 3.

## 4 Upprättande av Geotermisk modell

Här beskrivs en geotermisk modell som upprättas efter steg 3 i undersökningarna. En geotermisk modell kan vid behov också upprättas efter respektive steg i metodiken i erforderlig omfattning.

#### 4.1 Värdering av termiska data

Med tre värden på termisk resistivitet i varje grop bör man en indikation hur den varierar i z-led. Skikt av olika termisk resistivitet redovisas och mäktighet anges. Vid homogena förhållanden kan ett passande värde som representerar medelvärdet i jordprofilen väljas. På liknande sätt kan man med tre jordprover göra en bra bedömning av vilken jordtyp som representerar den specifika platsen.

Svårigheten är att bedöma om erhållna termiska resistiviteter är representativa och vattenhalten dimensionerande för den aktuella sträckningen och jordarten. En uppfattning om vattenhalten är på en dimensionerande nivå, erhålls genom att jämföra fält- och laborativvärden för vattenhalt vid provtagningstidpunkten med de som bestämts vid definierade vattenavförande tryck tillsammans med data från grundvattennivåer.

Prognos av kritiska grundvattennivåer kan göras med Chalmersmetoden om inte data har insamlats i observationsrör längs med sträckan under tillräckligt lång tid. Beroende på hur nivå förhåller sig gentemot den torraste nivån på 50-års basis (eller annan tidsperiod som valts för design) kan man justera prognosen för vatteninnehåll och då också den termiska resistiviteten.

#### 4.2 Uppställning av egenskapsmodeller proportionell mot sträckningen

Baserat på geomodellen och utvärderingen av de termiska mätningarna skapas en Geotermisk modell efter sträckningen innefattande termisk resistivitet och marktemperatur. Modellen tas fram i följande steg:

- Gruppering av jordarter i lämpliga jordartsklasser med hänsyn till grundvattenförhållanden
- Uppställning egenskapsmodeller för jordartsklasser
- Indelning av sträckning efter motsvarande jordartsklasser
- Framtagning av lämpligt statistiskt modelleringsverktyg
- Uppställning av egenskapsmodeller för olika jordarter
- Parametrisering av sträckning genom användande av statistiska metoder (termisk modellering). Detta innebär att ansätta parametrar för sträckningen/delsträckor
- Upprättande av egenskapsmodell(-er) för hela sträckningen eller delsträckor, och som är proportionella mot sträckningens eller del sträckornas längd.

Modelleringsverktyg kan t.ex. utgöras av Monte Carlo simulering. Denna kräver normalt normalfördelade egenskapsmodeller varför modelleringen görs på fördelningar av värmeledningsförmåga, som ofta kan vara normalfördelade. Dessa bör trunkeas för att inte fysiskt orimliga beräkningsresultat skall erhållas. Värmeledningsförmåga är som bekant inversen av termisk resistivitet. Fördelningen av termisk resistivitet inte normalfördelad utan skev. Fördelningen av termisk resistivitet skapas genom att invertera de enskilda beräkningsresultaten från modelleringen.

#### 4.3 Redovisning

Som underlag för den termiska dimensioneringen redovisas den Geotermiska modellen dels som egenskapsfördelningar och dels som en modell efter sträckningen. Modellen innefattar så väl termiska egenskaper som marktemperatur. Geomodellen redovisas integreras i den projektövergripande geomodellen.

## Bilaga 2

## Modellering – Fördelning av markens termiska resistivitet efter Sydvästlänken

Fältmätningar av termisk konduktivitet har använts som grund i normalfördelningar som Monte Carlo simuleringen utgår ifrån. Resultaterande konduktiviteter har sedan inverterats för att visa den termiska resistiviteten. Fältmätningarna är hämtade från Vecturas Sammanfattningsrapport över termiska egenskaper för mark i Sydvästlänken (Sundberg, 2012).

Normalfördelat slumpade värden för respektive jordklass har tagits fram i 192 003 punkter (1/meter) för att visualisera hur stor andel av sträckningen som kan vara underdimensionerad. De två kablarna med tvärsnittsarea för ledarna på 2010 mm<sup>2</sup> och 2590 mm<sup>2</sup> är dimensionerade för termisk resistiviteter i marken som inte överskrider 1.5 m·K/W respektive 2.0 m·K/W.

Fördelningarna som används är tagna från Vecturas rapport (Sundberg, 2012) och visas i Tabell 1. Observerade att fördelningarna är trunkerade för att förhindra orimligt låga/höga värden. För sträckor där ingen jordklass är utmärkt i ritningarna används medelvärden baserade på de övriga jordklasserna viktade efter hur stor andel av totalsträckan de utgör.

Tabell 1. Fördelningar av uppmätta termiska konduktiviteter från (Sundberg, 2012). Observera att dessa är uppmätta i termisk konduktivitet, vilket är inversen av termisk resistivitet. [W/(m·K)]

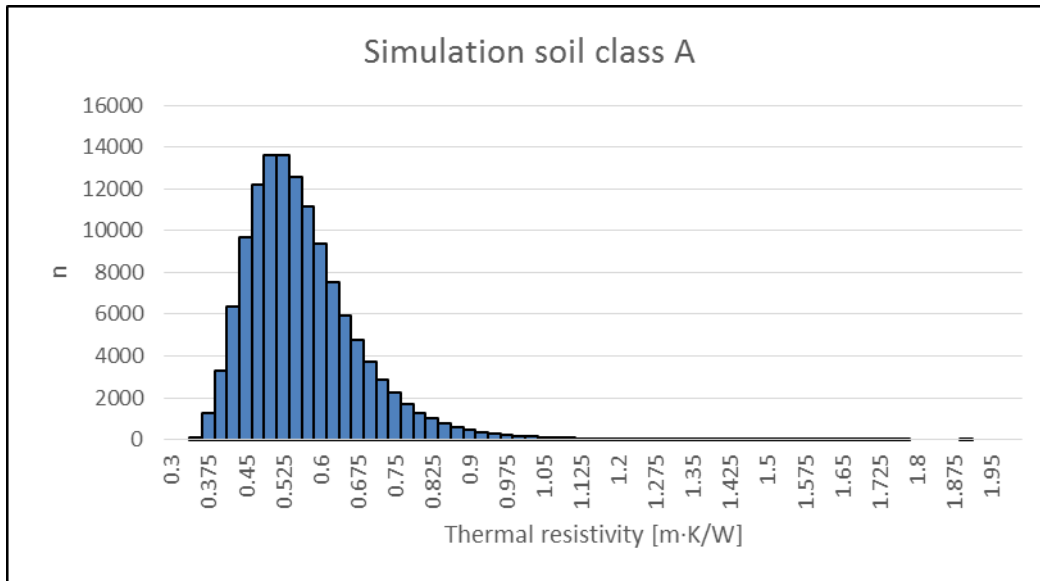
| Markklass      | Medel | Standardavvikelse | Max  | Min  | Trunkering övre | Trunkering nedre |
|----------------|-------|-------------------|------|------|-----------------|------------------|
| A              | 1.88  | 0.35              | 2.38 | 1.13 | 2.9             | 0.25             |
| B              | 1.43  | 0.43              | 2.70 | 0.54 | 2.9             | 0.24             |
| Torv           | 0.58  | 0.067             | 0.75 | 0.42 | 0.8             | 0.07             |
| Ospecificerade | 1.15  | 0.23              | 1.46 | 0.83 | 1.89            | 0.16             |

Tabell 2. De olika markklassernas längder och andelar av Sydvästlänken.

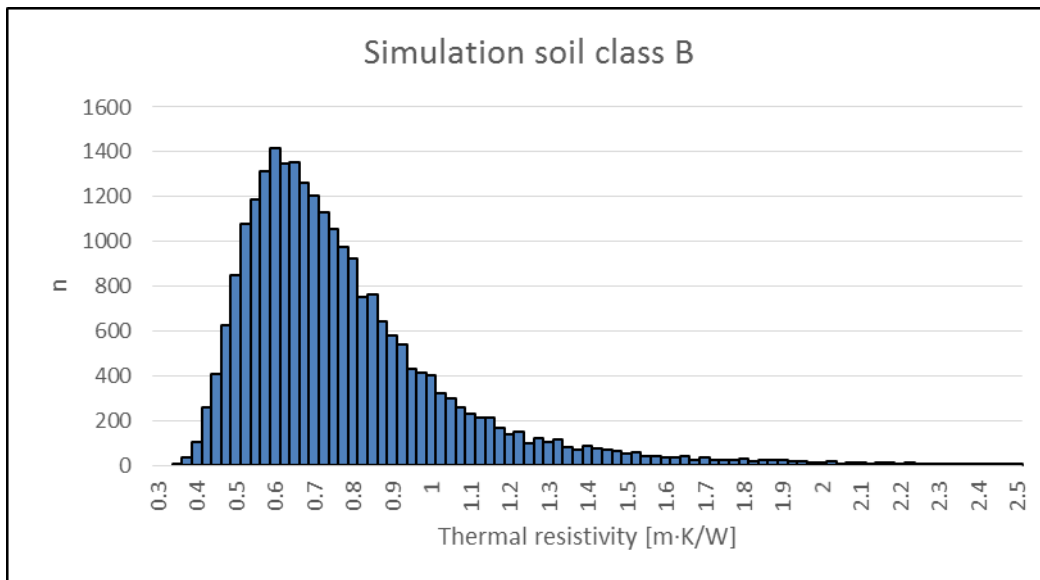
| Markklass     | Längd [m] | Andel av total längd |
|---------------|-----------|----------------------|
| A             | 127 891   | 66.6 %               |
| B             | 24 907    | 13.0 %               |
| Torv          | 31 997    | 16.7 %               |
| Ospecificerad | 7 208     | 3.8 %                |
| Totalt        | 192 003   | 100 %                |

Baserat på fördelningarna i Tabell 1 och längderna i har Monte Carlo simuleringar genomförts varje meter för respektive jordartsgrupp och resultatet av dessa kan ses i fördelningsdiagrammen i Figur 1 till Figur 4. En sammanslagning av alla termiska resistiviteter kan ses i Figur 5.

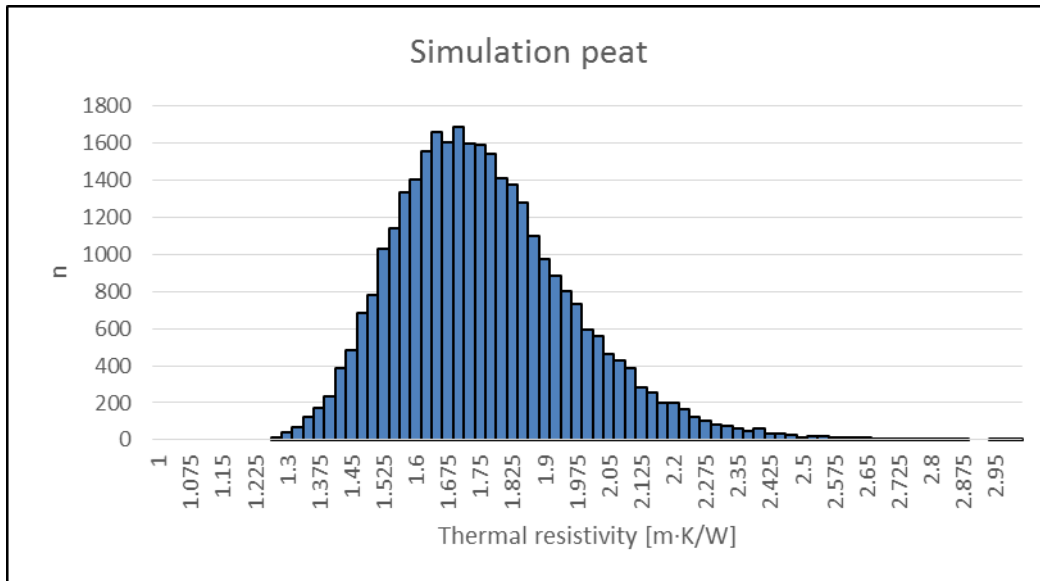




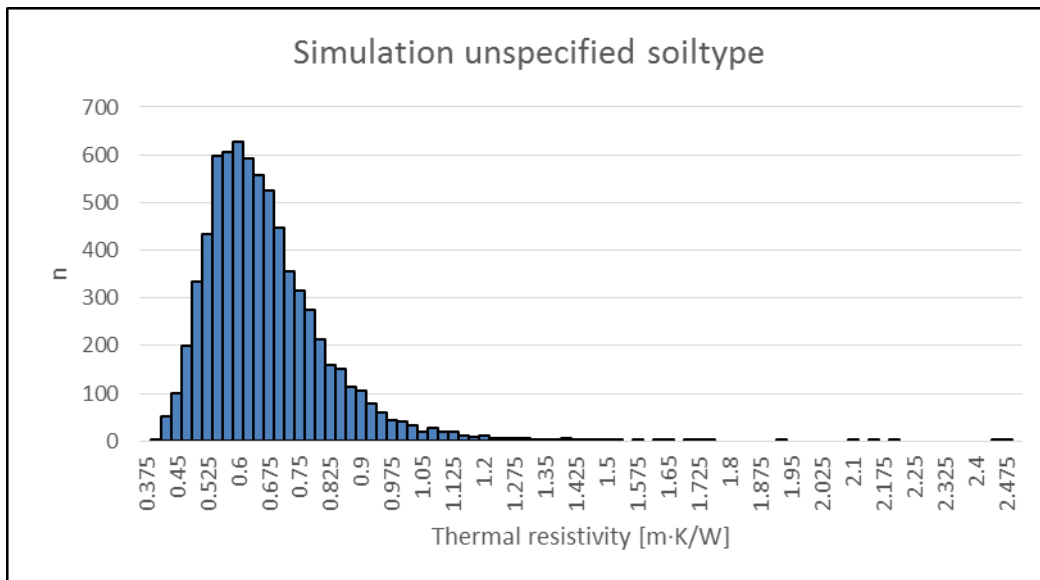
Figur 1. Monte Carlo simulering av jordklass A. 127 891 termiska resistiviteter är slumpmässigt framtagna baserat på fördelningen för jordklass A.



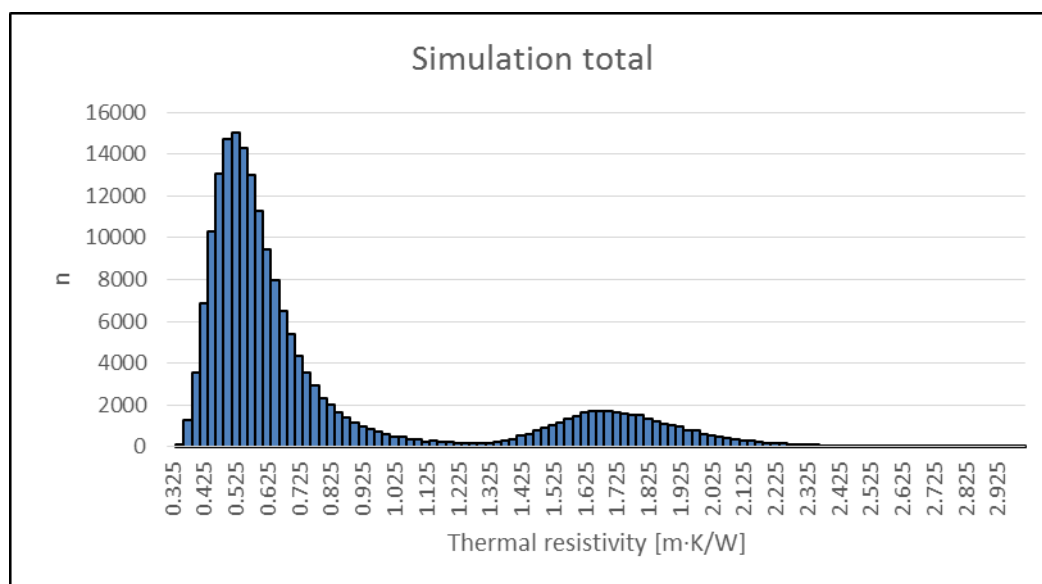
Figur 2. Monte Carlo simulering av jordklass B. 24 907 termiska resistiviteter är slumpmässigt framtagna baserat på fördelningen för jordklass B.



Figur 3. Monte Carlo simulering av torv. 31 997 termiska resistiviteter är slumpmässigt framtagna baserat på fördelningen för torv.



Figur 4. Monte Carlo simulering av sträckor där jordarten ej är specificerad. 7208 termiska resistiviteter är slumpmässigt framtagna baserat på en fördelning som är resultatet av ett viktat medelvärde av alla mätningar.



Figur 5. Monte Carlo simulering av hela Sydvästlänkens sträckning. 192003 termiska resistiviteterna är framtagna som resultatet av en sammanslagning av simuleringarna för jordklass A, jordklass B, torv samt de ospecificerade sträckorna.

Tabell 3 innehåller medelvärde och percentiler över fördelningarna av de termiska resistiviteterna framtagna med Monte Carlo simuleringen.

Tabell 3. Medelvärde och percentiler av termisk resistivitet i de olika jordartsklasserna. [m·K/W]

| Percentil  | A     | B     | Torv  | Ospecificerad | Total |
|------------|-------|-------|-------|---------------|-------|
| Medelvärde | 0.553 | 0.784 | 1.749 | 0.655         | 0.786 |
| 50:e       | 0.532 | 0.700 | 1.725 | 0.628         | 0.584 |
| 75:e       | 0.609 | 0.873 | 1.872 | 0.725         | 0.779 |
| 90:e       | 0.700 | 1.123 | 2.027 | 0.837         | 1.684 |
| 95:e       | 0.768 | 1.352 | 2.135 | 0.912         | 1.845 |
| 99:e       | 0.943 | 2.121 | 2.353 | 1.122         | 2.128 |

Som tidigare nämnts är de två kablarna med tvärsnittsarea för ledarna på 2010 mm<sup>2</sup> och 2590 mm<sup>2</sup> underdimensionerade när den termiska resistiviteten i marken överstiger 1.5 m·K/W respektive 2.0 m·K/W.

Andelen av totala sträckan i respektive jordart där detta inträffar enligt Monte Carlo simuleringen kan ses i Tabell 4 för 2010 mm<sup>2</sup> kabel och i Tabell 5 för 2590 mm<sup>2</sup> kabel.

Tabell 4. Andel av sträckan i respektive jordartstyp där den termiska resistiviteten överskrider 1.5 m·K/W.

|           | A        | B        | Torv     | Ospecificerad | Totalt   |
|-----------|----------|----------|----------|---------------|----------|
| Över 1.5  | 0.019 %  | 3.654 %  | 90.215 % | 0.153 %       | 15.526 % |
| Under 1.5 | 99.981 % | 96.346 % | 9.785 %  | 99.847 %      | 84.474 % |

I cirka 3.5 % av sträckan i jordklass B och 0.02 % i jordklass A överskrider markens termiska resistivitet 1.5 m·K/W. Detta motsvarar 910 meter respektive 24 meter. Totalt rör det sig om 29 811 meter, dominerat av torv.

Tabell 5. Andel av sträckan i respektive jordartstyp där den termiska resistiviteten överskrider 2.0 m·K/W.

|           | A        | B        | Torv     | Ospecificerad | Totalt   |
|-----------|----------|----------|----------|---------------|----------|
| Över 2.0  | 0.004 %  | 1.389 %  | 11.532 % | 0.000 %       | 2.105 %  |
| Under 2.0 | 99.996 % | 98.611 % | 88.468 % | 100.000 %     | 97.895 % |

Cirka 1.4 % av sträckan i jordklass B och 0.004 % av sträckan i jordklass A överskrider alltså utifrån Monte Carlo simuleringen 2.0 m·K/W. Det motsvarar 292 meter i jordklass B och 4 meter i jordklass A. Totalt sett överskrids 2.0 m·K/W i 1957 meter.

I passager i torv används större CC-avstånd och kabeln är här dimensionerad för att klara högre resistiviteter.

## Källförteckning

Sundberg, J. (2012). *Termiska egenskaper för mark - Sydvästlänken*. Göteborg: Vectura / Mark & Samhälle.

## Bilaga 3

## Kabeltyp, längder och fördelning av jordarter, Sydvästlänken

Områden där den tunna kabeltypen ( $d=2010\text{mm}^2$ ) är förlagd i jordtyp B kan vara underdimensionerad. De sträckor där detta inträffar har framtagits, och presenteras i detta dokument. Profilritningar från Sydvästlänken har använts för att ta fram data.

### Kabellängder– övergripande

Total längd, andel, och några andra nyckeltal rörande de två kabeltyperna som är förlagda i Sydvästlänken visas i Tabell 1. Det kan konstateras att nästan 60 % av de 192 km består av den tunna 2010  $\text{mm}^2$  kabeln.

Tabell 1. Nyckeltal över fördelning av 2010 och 2590 kabel i Sydvästlänken

| Kablar             | Tot    | 2010mm <sup>2</sup> | 2590mm <sup>2</sup> | Kommentar   |
|--------------------|--------|---------------------|---------------------|-------------|
| Längd [m]          | 192003 | 114398              | 77605               |             |
| % av total längd   | 100%   | 59.6%               | 40.4%               |             |
| Antal längder      | 144    | 76                  | 68                  |             |
| Medellängd [m]     | 1333   | 1505                | 1141                |             |
| Kortaste kabel [m] | 8      | 8                   | 8                   | 1 Se fotnot |
| Längsta kabel [m]  | 1825   | 1825                | 1340                |             |

<sup>1</sup>De korta kabellängderna beror på att en kabel kan ha flera beteckningar i CAD. Den kortaste kabeln är ca 400m.

### Jordklasser - övergripande

I Tabell 2 återfinns längdfördelningen av de olika jordklasserna längs med Sydvästlänken. Dessa är baserade på vilket förlägningsfall som är utfört. För en lista över förlägningsfall hänvisas till Tabell 3 på nästa sida.

Tabell 2. Nyckeltal över fördelning av jordklass längs med sydvästlänken.

| Jordklass         | A      | B     | C     | D    | E    | Ospecificerat | Total  |
|-------------------|--------|-------|-------|------|------|---------------|--------|
| Antal delsträckor | 573    | 163   | 272   | 34   | 26   | 69            | 1137   |
| Total längd [m]   | 127891 | 24907 | 26205 | 2241 | 3551 | 7208          | 192003 |
| % av total        | 67%    | 13%   | 14%   | 1%   | 2%   | 4%            | 100%   |

Tabell 3. *Simpel lista över förlägningsfall. Det stora flertalet förlägningsfall har varianter för att hantera olika situationer.*

| Förlägningsfall | Marktyp | Beskrivning   |
|-----------------|---------|---|
| 1               | a       | Trench i normal jord (typ A) , djup 1.2 m – 4 m                         |
| 2               | a       | Trench i normal jord (typ A), djup 4 m – 6 m                            |
| 3               | a       | Trench i normal jord (typ A) med 1 m mulljord                           |
| 4               | b       | Trench i torr jord (typ B)  |
| 5               | e       | Trench i dyig våtmark (typ E)   |
| 6               | c       | Trench genom grund normalfuktig torv (typ C)                            |
| 7               | d       | Trench genom torr torv (typ D) – 2590 mm <sup>2</sup>                   |
| 8               | c       | PE-rör i friktionsjord under grund normalfuktig torv (typ C)            |
| 9               | c       | Täckta PE-rör på botten av grund normalfuktig torv (typ C)              |
| 10              | e       | Täckta PE-rör på botten av grund mycket våt torv (typ E)                |
| 11              | c       | PE-rör på grund nivå i normalfuktig torv (typ C) – 2590 mm <sup>2</sup> |
| 12              | e       | PE-rör på grund nivå i mycket våt torv (typ E)                          |
| 13              | c       | Djup styrd borrning i normalfuktig torv (typ C) - 2590 mm <sup>2</sup>  |
| 14              | a       | Mycket liten väg på A-jord (b=7 m, h=0 m)                               |
| 15              | b       | Mycket liten väg på B-jord (b=7 m, h=0 m)                               |
| 16              | a       | Liten väg på A-jord (b=12 m, h=0 m)                                     |
| 17              | b       | Liten väg på B-jord (b=12 m, h=0 m)                                     |
| 18              | a       | Liten upphöjd väg på A-jord (b=12 m, h=1 m)                             |
| 19              | b       | Liten upphöjd väg på B-jord (b=12 m, h=1 m)                             |
| 20              | a       | Liten väg med hög bank på A-jord (b=12 m, h=5 m)                        |
| 21              | b       | Liten väg med hög bank på B-jord (b=12 m, h=5 m)                        |
| 22              | a       | Liten väg med mycket hög bank på A-jord (b=12 m, h=8 m)                 |
| 23              | b       | Liten väg med mycket hög bank på B-jord (b=12 m, h=8 m)                 |
| 24              | a       | Normalstor väg på A-jord (b=20 m, h=2 m)                                |
| 25              | b       | Normalstor väg på B-jord (b=20 m, h=2 m)                                |
| 26              | a       | Stor väg på A-jord (b=¥, h=3 m)   |
| 27              | b       | Stor väg på B-jord (b=¥, h=3 m)   |
| 28              | a       | Mycket stor väg på A-jord (b=¥, h=6 m)                                  |
| 29              | b       | Mycket stor väg på B-jord (b=¥, h=6 m)                                  |
| 30              | a       | Djup styrd borrning i A-jord (maxdjup 6 m)                              |
| 31              | b       | Djup styrd borrning i B-jord (maxdjup 6 m)                              |
| 32              | a       | Styrd borrning i A-jord + liten väg med hög bank (b=12 m, h=5 m)        |
| 33              | b       | Styrd borrning i B-jord + liten väg med hög bank (b=12 m, h=5 m)        |
| 34              | -       | Instruktion för korsningar med andra kraftkablar                        |

**Standardfall – förlägningsfall 1**

Standardförläggning, det vill säga förlägningsfall 1 (se Tabell 3), är utförd på totalt 265 sträckor om en total längd av 90 151 m.

**B-jord i 2010mm<sup>2</sup> kabel**

Tabell 4 visar hur stor del av Sydvästlänken där 2010mm<sup>2</sup> kabel är förlagd i jordklass B. Eftersom 2010-kabeln är tänkt att vara förlagd i jord med termisk resistivitet på mindre än 1.5 mK/W finns risk att delar av dessa sträckor är underdimensionerade.

Tabell 4. Överblick för delsträckor med tunn kabel i jordklass B.

|  |       |
|--|-------|
| Total längd tunn kabel i jordklass B [m]                   | 9575  |
| Andel av Sydvästlänken                                     | 5 %   |
| Medellängd för delsträcka med tunn kabel i jordklass B [m] | 121.2 |
| Antal delsträckor med tunn kabel i jordklass B             | 79    |

Tabell 5 visar en tabell över de sträckor där 2010 mm<sup>2</sup> kabel är förlagd i jordklass B.

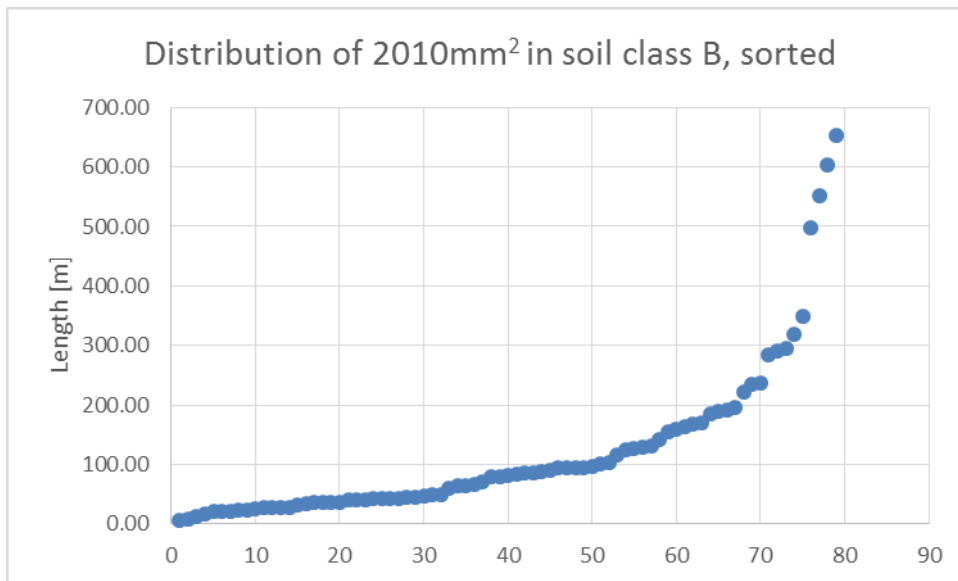


Tabell 5. Tabell över de sträckor där kabel med ledningsarea om 2010 mm<sup>2</sup> är förlagd i jordklass B. Kolumnerna för start och slut representerar avståndet från Sydvästlänkens start enligt plan och profilritningar.

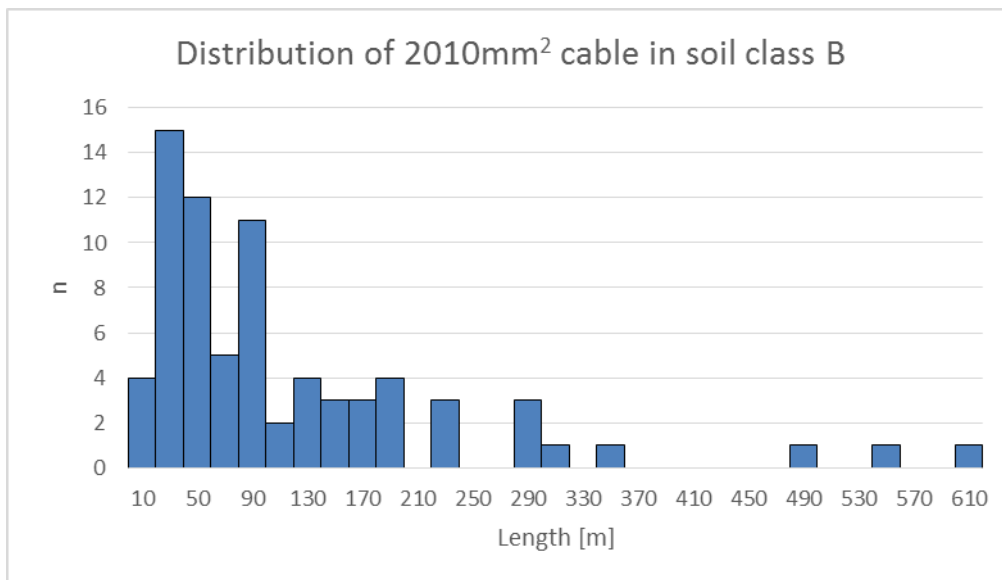
| Norra sträckan |              |           |                  |  |
|----------------|--------------|-----------|------------------|--|
| Start          | Slut         | Längd     | Förläggningsfall | Kommentar  |
| 4770           | 4896         | 126       | 4(a-b)-1         |  |
| 8698           | 8768         | 70        | 4(a-b)-1         |  |
| 9647           | 9670         | 23        | 4(a-b)-1         |  |
| Södra sträckan |              |           |                  |  |
| Start          | Slut         | Längd     | Förläggningsfall | Kommentar  |
| 93             | 248          | 155       | 4(a-b)-1         |  |
| 36123          | 36143        | 20        | 4(a-b)-1         |  |
| 36202          | 36327        | 125       | 4(a-b)-1         |  |
| 36474          | 36574        | 100       | 4(a-b)-1         |  |
| <b>60175</b>   | <b>60224</b> | <b>49</b> | <b>19</b>        | <b>Oklart förläggningsfall</b>                           |
| <b>60224</b>   | <b>60257</b> | <b>33</b> | <b>17</b>        | <b>Oklart förläggningsfall</b>                           |
| 65506          | 65727        | 221       | 4(a-b)-1         |  |
| 66005          | 66173        | 168       | 4(a-b)-1         |  |
| 66173          | 66209        | 36        | 4(a-b)-1         |  |
| 66209          | 66237        | 28        | 17b              |  |
| 66237          | 66788        | 551       | 4(a-b)-1         |  |
| 66788          | 66820        | 32        | 17b              |  |
| 66820          | 67317        | 497       | 4(a-b)-1         |  |
| 67317          | 67382        | 65        | 17b              |  |
| 67382          | 67673        | 291       | 4(a-b)-1         |  |
| 68082          | 68316        | 234       | 4(a-b)-1         |  |
| 69048          | 69075        | 27        | 4(a-b)-1         |  |
| 69075          | 69084        | 9         | 15a              |  |
| 69084          | 69112        | 28        | 4(a-b)-1         |  |
| 69398          | 69488        | 90        | 4(a-b)-2         |  |
| 69488          | 69658        | 170       | 4(a-b)-1         |  |
| 69911          | 70515        | 604       | 4(a-b)-1         |  |
| 70515          | 70558        | 43        | 25a              |  |
| 70558          | 70601        | 43        | 4(a-b)-4         |  |
| 70601          | 70645        | 44        | 4(a-b)-1         |  |
| 70782          | 70832        | 50        | 4(a-b)-1         |  |
| 70832          | 71182        | 350       | 4(a-b)-1         |  |
| 72655          | 72840        | 185       | 4(a-b)-1         |  |
| 73822          | 73902        | 80        | 4(a-b)-1         |  |
| 73902          | 73927        | 25        | 4(a-b)-3         |  |
| 73927          | 73994        | 67        | 4(a-b)-1         |  |
| 74712          | 74753        | 41        | 4(a-b)-1         |  |
| 74832          | 74911        | 79        | 4(a-b)-1         |  |
| <b>84175</b>   | <b>84180</b> | <b>5</b>  | <b>4(a-b)-7</b>  | <b>Förläggningsfallet avsett för 2590 mm<sup>2</sup></b> |
| 84180          | 84197        | 17        | 4(a-b)-2         |  |
| 84197          | 84360        | 163       | 4(a-b)-1         |  |
| 84700          | 84890        | 190       | 4(a-b)-1         |  |
| 85162          | 85256        | 94        | 4(a-b)-1         |  |
| 85561          | 85752        | 191       | 4(a-b)-1         |  |
| 93679          | 93762        | 83        | 4(a-b)-1         |  |

|               |               |            |              |  |                         |
|---------------|---------------|------------|--------------|--|-------------------------|
| 93848         | 94043         | 195        | 4(a-b)-1     | Förläggningsfallet avsett för 2590 mm <sup>2</sup> |                         |
| 94143         | 94258         | 115        | 4(a-b)-1     |  |                         |
| 94948         | 94988         | 40         | 4(a-b)-1     |  |                         |
| 95600         | 95884         | 284        | 4(a-b)-1     |  |                         |
| 97012         | 97040         | 28         | 17b          |  |                         |
| 97040         | 97076         | 36         | 4(a-b)-2     |  |                         |
| 97172         | 97267         | 95         | 4(a-b)-1     |  |                         |
| 97409         | 97568         | 159        | 4(a-b)-1     |  |                         |
| 97568         | 97603         | 35         | 17b          |  |                         |
| 97603         | 97698         | 95         | 4(a-b)-1     |  |                         |
| 97752         | 97798         | 46         | 4(a-b)-1     |  |                         |
| 97833         | 98128         | 295        | 4(a-b)-1     |  |                         |
| 98128         | 98170         | 42         | 4(a-b)-2     |  |                         |
| 98170         | 98258         | 88         | 4(a-b)-1     |  |                         |
| 109099        | 109240        | 141        | 4(a-b)-1     |  |                         |
| 131820        | 131906        | 86         | 4(a-b)-1     |  |                         |
| 131906        | 131950        | 44         | 17b          |  |                         |
| 133182        | 133500        | 318        | 4(a-b)-1     |  |                         |
| 133598        | 133619        | 21         | 4(a-b)-1     |  |                         |
| 133619        | 133748        | 129        | 4(a-b)-1     |  |                         |
| <b>133748</b> | <b>133850</b> | <b>102</b> | <b>31b</b>   |  |                         |
| 133850        | 134087        | 237        | 4(a-b)-1     |  |                         |
| 134130        | 134215        | 85         | 4(a-b)-1     |  |                         |
| 134268        | 134292        | 24         | 4(a-b)-1     |  |                         |
| 134692        | 134728        | 36         | 4(a-b)-1     |  |                         |
| 134856        | 134920        | 64         | 4(a-b)-1     |  |                         |
| 136604        | 137257        | 653        | 4(a-b)-1     |  |                         |
| 137257        | 137270        | 13         | 15a          |  |                         |
| 137270        | 137365        | 95         | 4(a-b)-1     |  |                         |
| 137768        | 137865        | 97         | 4(a-b)-1     |  |                         |
| 137865        | 137906        | 41         | 17b          |  |                         |
| 137906        | 137948        | 42         | 4(a-b)-1     |  |                         |
| <b>157357</b> | <b>157487</b> | <b>130</b> | <b>4a</b>    |  | Oklart förläggningsfall |
| <b>176700</b> | <b>176759</b> | <b>59</b>  | <b>4-a-2</b> |  | Oklart förläggningsfall |
| <b>177119</b> | <b>177140</b> | <b>21</b>  | <b>4-a-2</b> |  | Oklart förläggningsfall |
| 179908        | 179990        | 82         | 21a          |  |                         |

Figur 1 och Figur 2 visar hur längderna på de sträckor där 2010-kabel är förlagd i markklass B fördelar sig.



Figur 1. Sorterad fördelning av längden på de sträckor där 2010-kabel är förlagd i markklass B.



Figur 2. Fördelningsdiagram över längden på de sträckor där 2010-kabel är förlagd i markklass B. Varje stapel representerar ett intervall om 20 meter. (1-20m, 21-40 etc.)