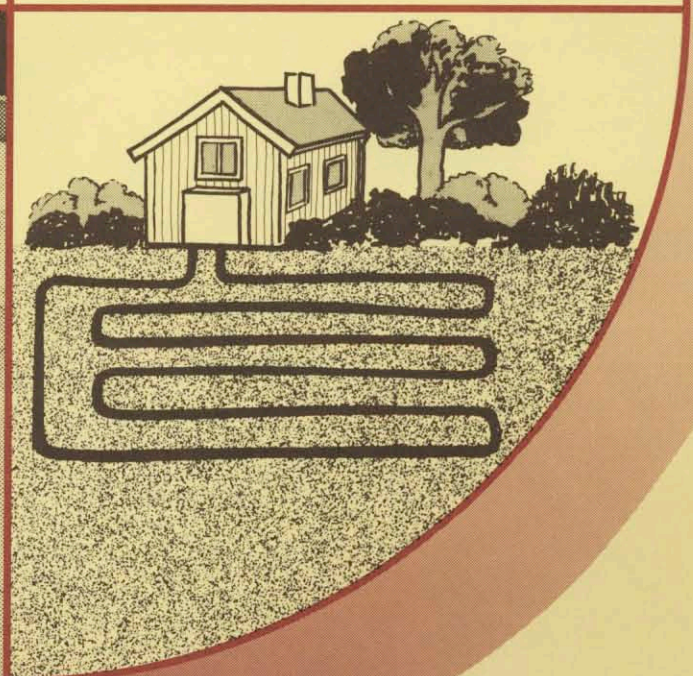
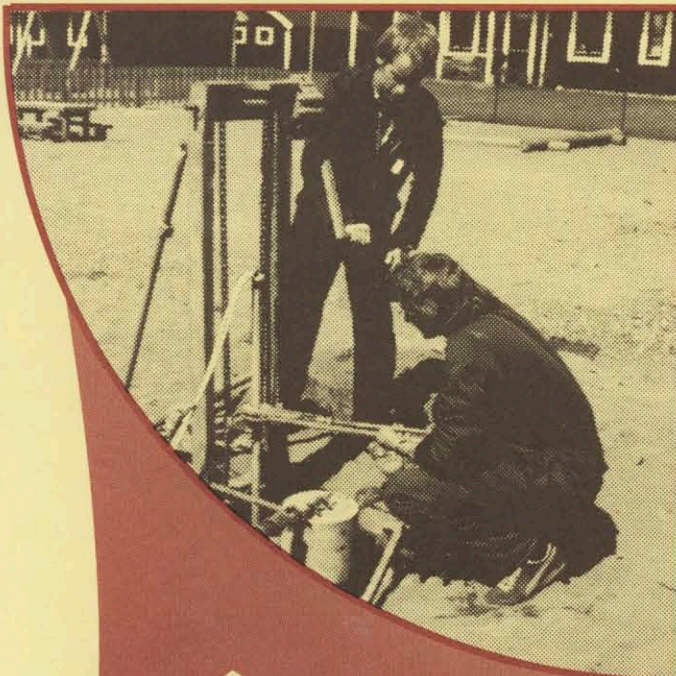
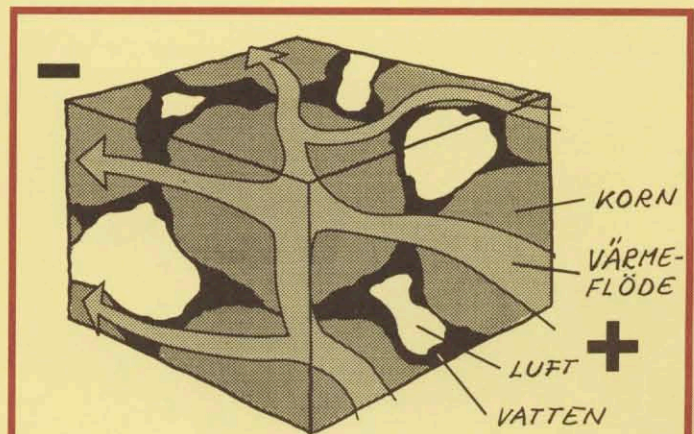


Termiska egenskaper i jord och berg

Jan Sundberg





STATENS GEOTEKNISKA INSTITUT
SWEDISH GEOTECHNICAL INSTITUTE

Information 12

Termiska egenskaper i jord och berg

JAN SUNDBERG

Information	Statens geotekniska institut (SGI) 581 93 Linköping
Beställning	SGI Informationstjänsten Tel: 013-20 18 04 Fax: 013-20 19 09 E-post: info@swedgeo.se Internet: www.swedgeo.se
ISSN	0281-7578
ISRN	SGI-INF--91/12--SE
Tryckeri	Tryck-Center, Linköping, september 1991

Innehållsförteckning

FÖRORD	5
1. EXEMPEL PÅ ANVÄNDNINGSOMRÅDEN	6
2. TERMISKA EGENSKAPER I JORD OCH BERG	7
3. TERMISKA EGENSKAPER - NÅGRA VIKTIGA FAKTORER	14
4. METODER FÖR BESTÄMNING AV TERMISKA EGENSKAPER	21
5. JORD- OCH BERGARTER	24
6. LITTERATUR	27

Förord

Syfte och målgrupp

Informationsskriftens syfte är att sprida kunskap om jord och bergs termiska egenskaper. Målgruppen är i första hand konsulter och entreprenörer med verksamhet inom mark-, vatten- och energiområdet.

Uppläggning

Informationsskriften är upplagd i flera nivåer. Tyngdpunkten är lagd på variationsområden för termiska egenskaper och behandlas i avsnitt 2. En djupare genomgång av bakomliggande faktorer och metoder behandlas i avsnitten 3 och 4. En kort översikt över Sveriges geologi samt jords och bergs uppbyggnad görs i avsnitt 5. Litteraturtips, för den som vill läsa vidare, finns angivna under avsnitt 6.

Datorprogram

Till informationsskriften finns utvecklat ett självinstruerande persondatorprogram. Programmet är avsett för den som vill göra egna, noggrannare, beräkningar. Programmet är anpassat för både jord och berg och kan ta hänsyn till bl.a. mineralfördelning, vattenhalt och temperaturnivå. Programdiskett kan beställas. Information om programmet lämnas av Jan Sundberg, se avsnitt 6.

Medverkande

Informationsskriften har utarbetats i samarbete mellan Byggforskningsrådet och Statens geotekniska institut. Jan Sundberg, Terratema AB, har författat innehållet. Värdefulla synpunkter har lämnats av Bengt Rydell, Jan Lindgren och Caroline Magnusson, SGI, samt Björn Sellberg, BFR, Erik Saare, KTH, Torbjörn Fagerlind, SGU, Ingvar Rhén, VBB-VIAK, och Bo Carlsson, Terratema AB.

Linköping i augusti 1991

Jan Sundberg

1. Exempel på användningsområden

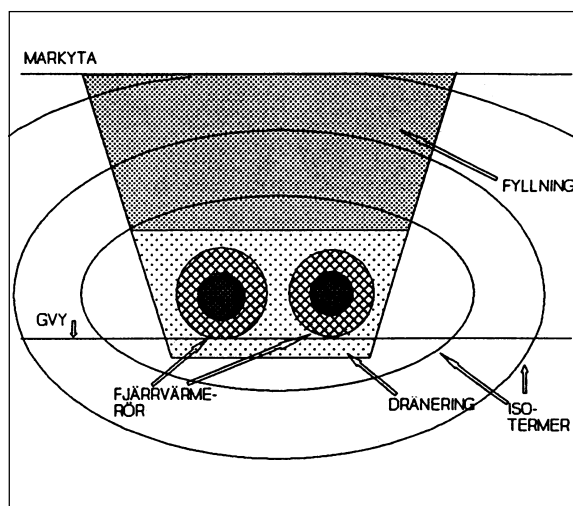
Känedom om de termiska egenskaperna för jord och berg är nödvändiga i flera sammanhang. Några exempel är utvinning och lagring av energi i mark, beräkning av tjalningsprocessen i mark samt bestämning av värmeförluster från elkablar, värmekulvertar och byggnader.

Figur 1 visar värmeförluster från fjärrvärmerör. Omgivande jords isolerande förmåga kan spela en väsentlig roll för den totala värmeförlustens storlek, speciellt vid äldre installationer med otillräcklig isolering. En hög grundvattenyta, i kombination med dålig dränering eller återfyllnad med kapillärt sugande massor, kan leda till att värmeförlusten påtagligt ökar. Ett genomtänkt utförande kan å andra sidan minska förlusterna.

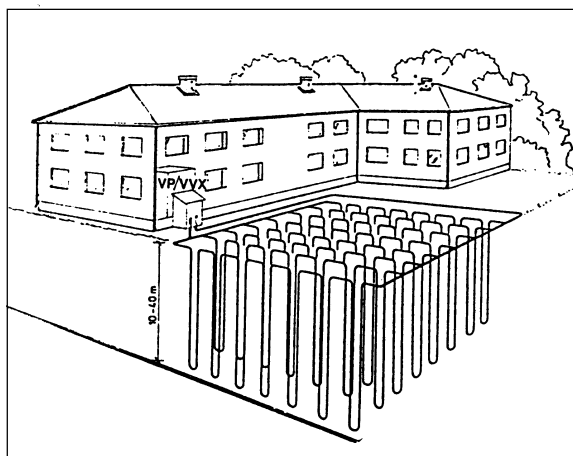
Markförlagda elkablar är i behov av god bortledning av producerad värme för att undvika en oacceptabelt hög temperatur och termisk kollaps av kabeln. Förläggning i vissa jordarter kan medföra att en uttorkning av jorden sker närmast kabel varpå värmemotståndet i jorden, och därmed också temperaturen i kabeln, ökar.

Isolering av markförlagda värmelager (**Figur 2**) kan vara både dyrbart och svårt att genomföra med bibehållen funktion. Genom att utnyttja markens värmemotstånd erhålls en naturlig isolering och den konstgjorda isoleringen kan minskas och i vissa fall helt uteslutas.

Energitillförseln till s.k. *energi-brunnar* (bergvärme) styrs av bergets värmeledande förmåga. (Bergvärme skall inte förväxlas med grundvattenvärme där vatten pumpas till en brunn för energändamål och vattnets energiinnehåll har den avgörande betydelsen).



Figur 1. Fjärrvärmerör i mark.



Figur 2. Exempel på teknik för värmelagring i jord.

2. Termiska egenskaper i jord och berg

Värmetransporterande mekanismer

- VÄRMELEDNING
- KONVEKTION
- ÅNGDIFFUSION
- STRÅLNING

Termiska egenskaper i jord

Termiska egenskaper i sedimentärt berg

Termiska egenskaper i kristallint berg

I begreppet termiska egenskaper inbegrips normalt:

- *Värmeledningsförmåga* λ , $W/(m \cdot ^\circ C)$ (transport av energi)
- *Värmekapacitet* C^1 , $kWh/(m^3 \cdot ^\circ C)$ (lagring av energi)
- *Värmediffusivitet* κ , m^2/s (utjämning av temperaturskillnader)

Mellan dessa tre egenskaper finns följande samband:

$$\kappa = \lambda C^1$$

Även andra värmetransporterande mekanismer finns och kan vara betydande. Dessa beskrivs översiktligt i nästkommande avsnitt varefter variationsområden för värmeledningsförmåga och värmekapacitet i jord och berg beskrivs.

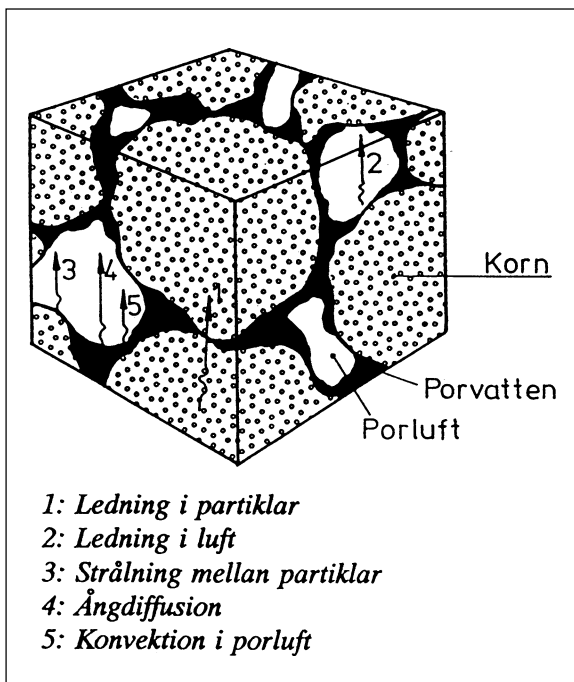
¹ Värmekapaciteten C kan också skrivas som produkten $\rho \cdot c$, där ρ är densitet (kg/m^3) och c är värmekapacitet per viktsenhet ($kWh/(kg \cdot ^\circ C)$).

Värmetransporterande mekanismer

Värmetransport i mark kan ske genom en rad olika mekanismer; *ledning*, *strålning*, *konvektion* och *ångdiffusion*, se **Figur 3**. Vid normal marktemperatur och låg temperaturgradient dominerar

värmetransport genom ledning och bestäms då av markens värmeledningsförmåga. Olika värmetransporterande mekanismers betydelse vid olika temperatur sammanfattas i **Tabell 1**.

Värmekapaciteten eller värmelagringsförmågan är relativt konstant för olika bergarter. För



Figur 3. Värmetransporterande mekanismer (efter Johansen, 1975).

porösa material inverkar materialets täthet och vattenhalt. Ett löst packat material med hög vattenhalt är bäst ur värmelagringsynpunkt.

Värmeledning

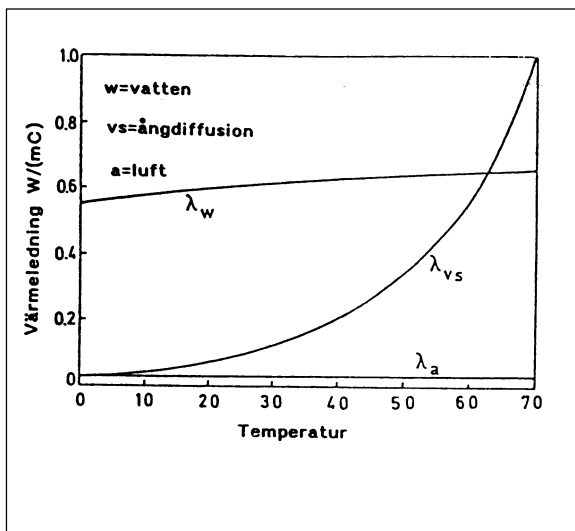
Vattenhalt och porositet är två viktiga parametrar för värmeledningens effektivitet. Låg porositet (hög densitet) innebär att kornen, som leder värme bra, kommer närmare varandra (extremfallet är en bergart). Ökande vatteninnehåll innebär att kontakten mellan kornen förbättras (vatten är ca 20 ggr bättre värmeledare än luft).

Konvektion

Konvektion (naturlig eller påtvingad vatten- eller luftcirkulation) kan under vissa förhållanden och framförallt i kraftigt vattenförande material spela en betydande roll. Naturlig konvektion i mark orsakas av vattnets *densitetsskillnad* vid olika temperatur. Påtvingad konvektion är en vattenrörelse som orsakas av *potentialskillnader*, t.ex. pumpning.

Tabell 1. Värmetransporterande mekanismer i jord vid olika temperaturer.

Temperatur under 0 °C
Värmeledning är det dominerande transportsättet. Det latent värme som frigörs vid fasomvandling vatten/is är av stor betydelse i vattenhaltiga porösa material.
Temperatur mellan 0 °C och ca 25 °C
Värmeledning är fortfarande det dominerande transportsättet. I mycket permeabelt material och under hög gradient kan påtvingad konvektion vara helt dominerande. Vid stor temperaturskillnad i permeabelt material kan även naturlig konvektion få en viss betydelse. Ångdiffusion kan vid den övre temperaturgränsen ha en mindre betydelse.
Temperatur mellan ca 25 °C och ca 95 °C
I nedre delen av intervallet är värmeledning fortfarande det dominerande transportsättet. Vid högre temperatur blir ångdiffusion alltmer påtaglig vid låg och medelhög vattenmättnadsgrad. För vattenmättade förhållanden är ren värmeledning, även vid högre temperatur, dominerande. För konvektion gäller här samma förhållanden som beskrivits under föregående punkt. I grövre jordarter vid hög temperatur kan strålning ha en viss betydelse.



Figur 4. Ångdiffusionens storlek jämfört med värmeledningsförmågan i vatten och luft (de Vries, 1975).

Ångdiffusion

Vid högre temperaturer i porösa material (jord och sedimentärt berg) får ångdiffusion en växande betydelse. Detta beror på att ångdiffusionens bidrag till värmetransporten i luft ökar exponentiellt med ökande temperatur, se **Figur 4**. Summan av ångdiffusion och värmeledning kan ses som en "fiktiv värmeledningsförmåga". Denna kan då bli

större vid medelhög mättnadsgrad än vid full vattenmättnad om temperaturen är tillräckligt hög.

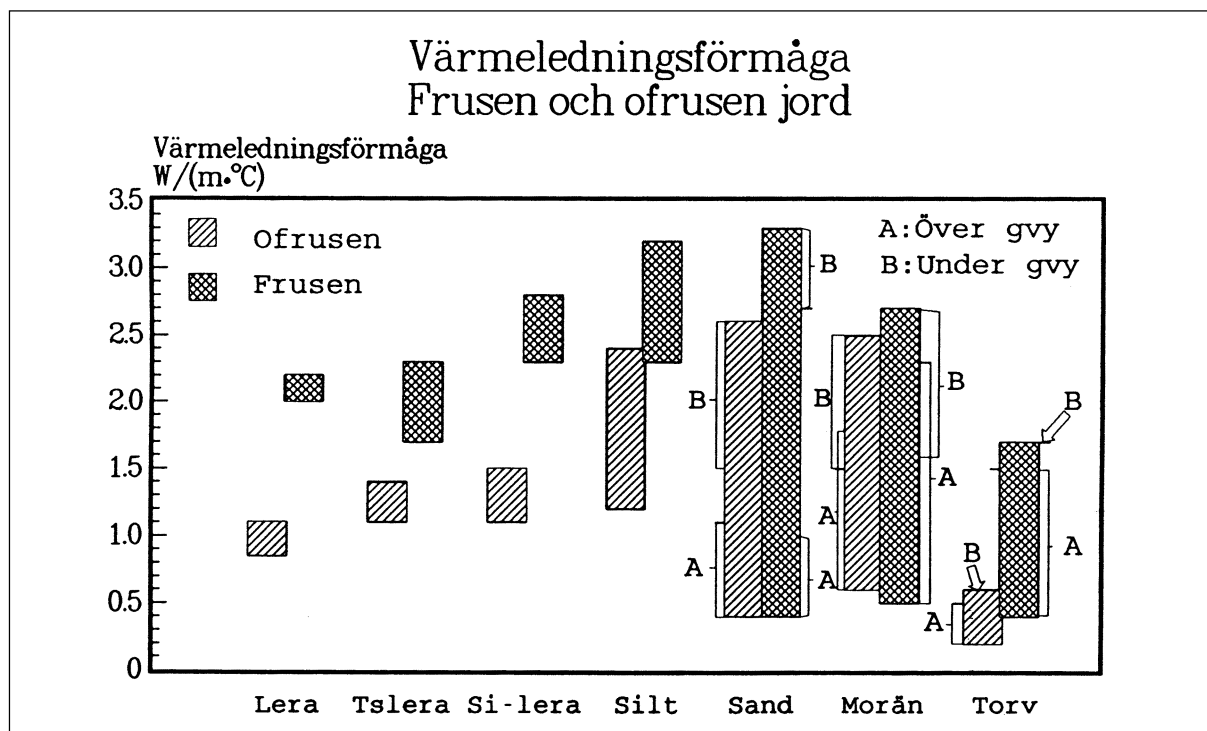
STRÅLNING

Strålning kan ha en viss betydelse vid grovkorniga material vid hög temperatur och relativt torra förhållanden (t.ex vägbankar). Inverkan är dock begränsad och kan vid hög temperatur och torrt material som mest ge ett tillägg till värmeledningsförmågan av 10 – 20 %.

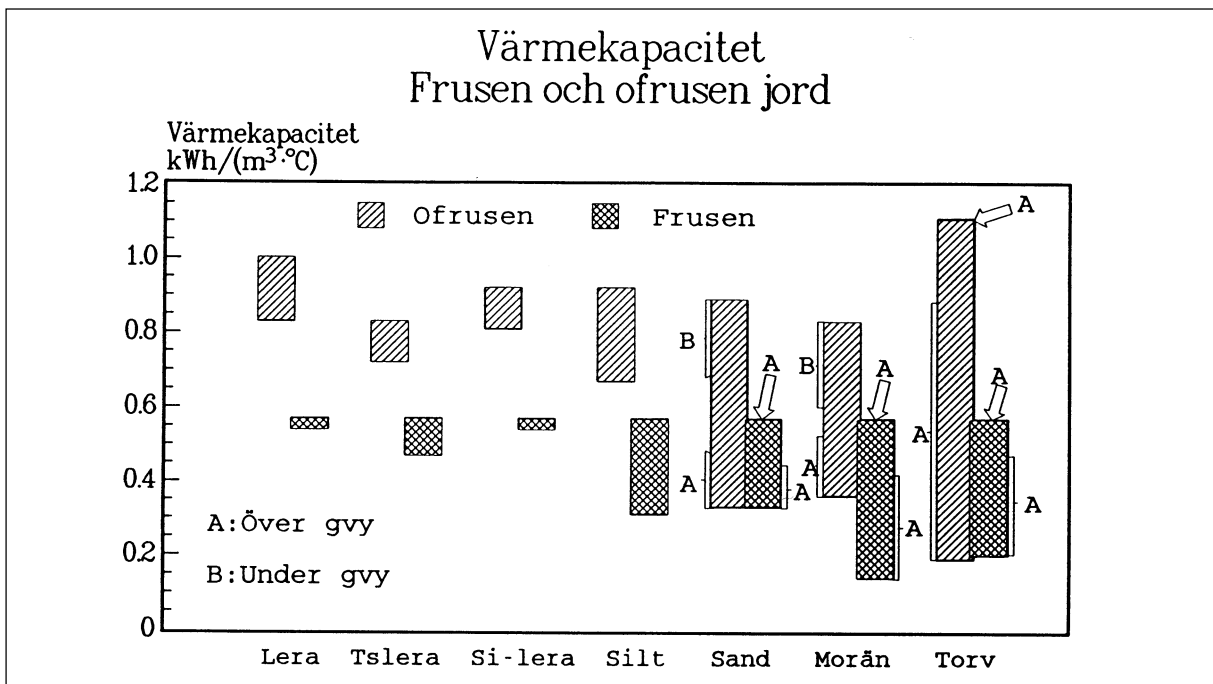
Termiska egenskaper i jord

Värmeledningsförmågan för jord varierar i första hand med avseende på vattenhalt och densitet (porositet). I **Figur 5** visas värmeledningsförmågans variationsområde för olika jordarter vid normal marktemperatur (5 – 15 °C) och helt frusen jord. Värmekapaciteten anges på motsvarande sätt i **Figur 6** och is-bildningsvärmerna i **Figur 7**. Figurerna visar det normala variationsområdet. Extremvärden utöver detta kan förekomma.

Finkorniga jordarter håller vatten väl och har därför inte ett så stort variationsområde. I **Figur 5**, **6** och **7** representeras dessa av lera (med högt lerinnehåll), torrskorpelera (Tslera), siltig lera (Si-lera) samt silt.



Figur 5. Värmeledningsförmåga för olika jordarter i ofrusen och frusen tillstånd. Genomsläppliga jordar har markeringar för normalt variationsområde ovan (A) resp under grundvattenytan (B).



Figur 6. Värmekapacitet för olika jordarter i ofruset och fruset tillstånd, se även figur 5.

Mer grovkorniga jordarter som sand och grus dräneras lätt på vatten ovan grundvatten- ytan och får därför ett större variationsområde.

Morän har normalt goda vattenhållande egenskaper men kan för sandiga-grusiga moräner uppvisa dränerande egenskaper.

Torv har i allmänhet mycket hög porositet, närmare ca 90 – 95 %, varför dess termiska egenskaper vid vattenmättnad liknar de för vatten. Vissalåghumifierade torvjordar har förhållandevis dåliga vattenhållande egenskaper vilket ger låg värmeledningsförmåga ovan grundvattenytan.

Jordarter med stort variationsområde på grund av varierande vattenhalt (genomsläppliga jordar) har markeringar i **Figur 5, 6** och **7** som avser ett normalt område ovan (A) respektive under grundvattenytan (B). Normalt har morän och torv ett betydligt mindre variationsområde eftersom de vanligen är relativt svårdränerade.

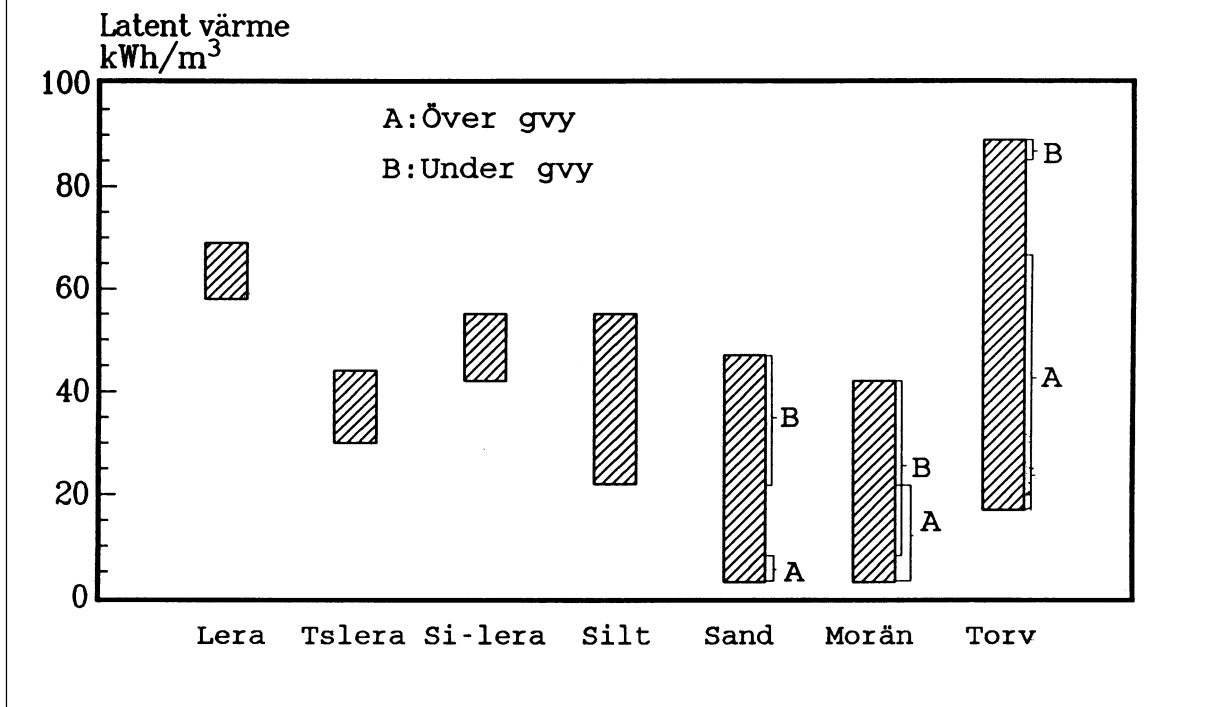
Figureerna visar också att värmeledningsförmågan ökar vid *fruset tillstånd* om jorden är relativt vattenmättad. Vidare framgår att ett vattenmättat jordmaterial i fruset tillstånd kan leda värme upp till åtta gånger bättre än motsvarande ej frusna material ovan grundvattenytan. För finkorniga jordar eller vid vattenmättade förhållanden är variationsområdet betydligt mindre, ca tre gånger. Variations- området för värmekapacitet blir min-

dre vid övergång till fruset tillstånd samtidigt som absolutnivån sjunker.

I verkligheten finns det ett övergångsområde mellan ofrusen och helt frusen jord på grund av en viss del ofruset vatten vid temperatur under 0 °C (speciellt för finkorniga jordarter). Ett visst beroende finns också av mineralsammansättningen. Dessa faktorer diskuteras i kapitel 3 under rubrikerna "temperatur" respektive "mineralsammansättning".

En ansenlig värmemängd frigörs när en vattenhållande jord fryser. Denna s.k. latent värme eller isbildningsvärme varierar vanligen mellan 40–45 kWh/m³ för jordar med hög vattenmättnad, för att minska drastiskt vid permeabla jordar över grundvattenytan (sand, grus, grusig morän). I en vattenmättad torv frigörs upp mot 90 kWh/m³ vid frysning.

Latent värme i jord Övergång till helt fruset tillstånd



Figur 7. Latent värme eller isbildningsvärme i jord, se även figur 5.

Termiska egenskaper i sedimentärt berg

I sedimentärt berg varierar värmeledningsförmågan främst beroende på *porositet* och *vat- tenhalt* men även beroende på *mineralinnehållet*. I **Figur 8** har värmeledningsmätningar från Danmark och Gotland tillsammans med beräknade värden sammanställts. Sedimentära bergarter finns i första hand i Skåne, på Gotland och Öland samt inom fjällkedjan. Som framgår av **Figur 8** kan värden från 1,5 (yngre kalksten och skiffer) till 6,5 W/(m °C) (äldre kvartsitisk sandsten) förväntas om berget är vattenmättat. Mesozoiska bergarter finns huvudsakligen i Skåne. Kambrosiluriska bildningar finns huvudsakligen på Gotland och Öland samt i mindre omfattning på andra håll i södra och mellersta Sverige (t.ex. delar av Skåne, Östgötaslätten, Närke-slätten). Prekambrisk sandsten finns i stor omfattning i Dalarna och Härjedalen.

Termiska egenskaper i kristallint berg

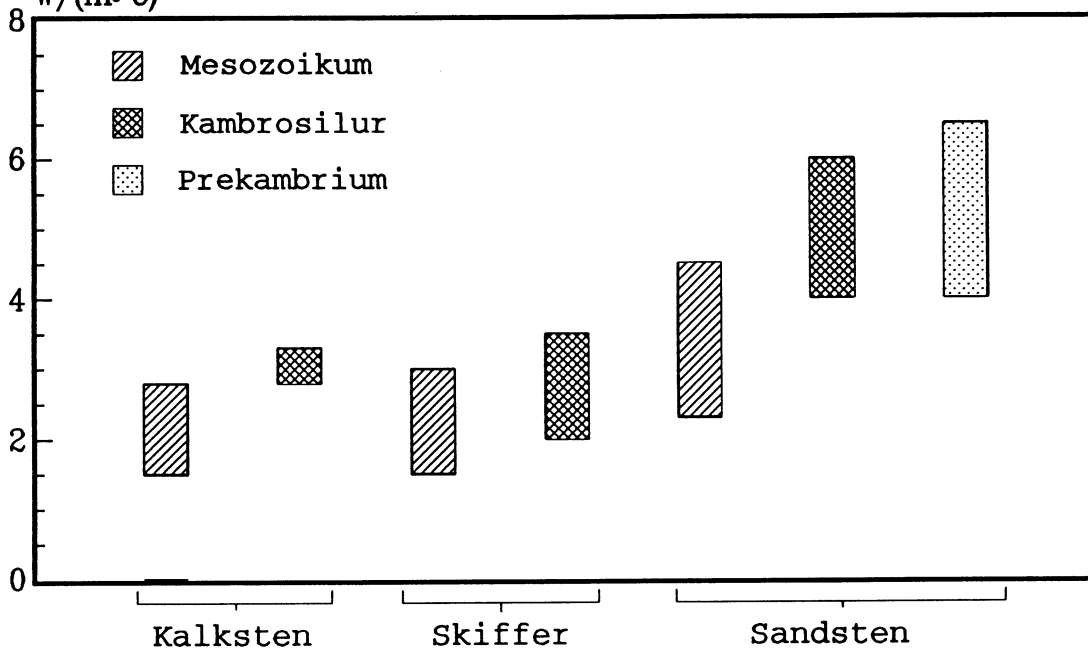
Mineralinnehållet är den viktigaste faktorn för värmeledningsförmågan i kristallint berg. Ett högt kvartsinnehåll ger en hög värmeledningsförmåga. Kristallint berg indelas i magmatiska och metamorfa bergarter. I **Figur 9** ges variationsområdet för några *magmatiska* bergarter.

För den vanligaste bergarten i Sverige, granit, är värmeledningsförmågan normalt inom intervallet 3 – 4 W/(m °C). Mer basiska bergarter som syenit har en värmeledningsförmåga mellan 2 och 3 W/(m °C). För mycket basiska bergarter ökar återigen värmeledningsförmågan beroende på ökande innehåll av bl a olivin eller pyroxen som leder värme väl.

För *metamorfa* eller omvandlade bergarter (**Figur 10**) är variationsområdet större beroende på ökad spridning i mineralsammansätt-

Sedimentära bergarter

Värmeledningsförmåga
W/(m·°C)

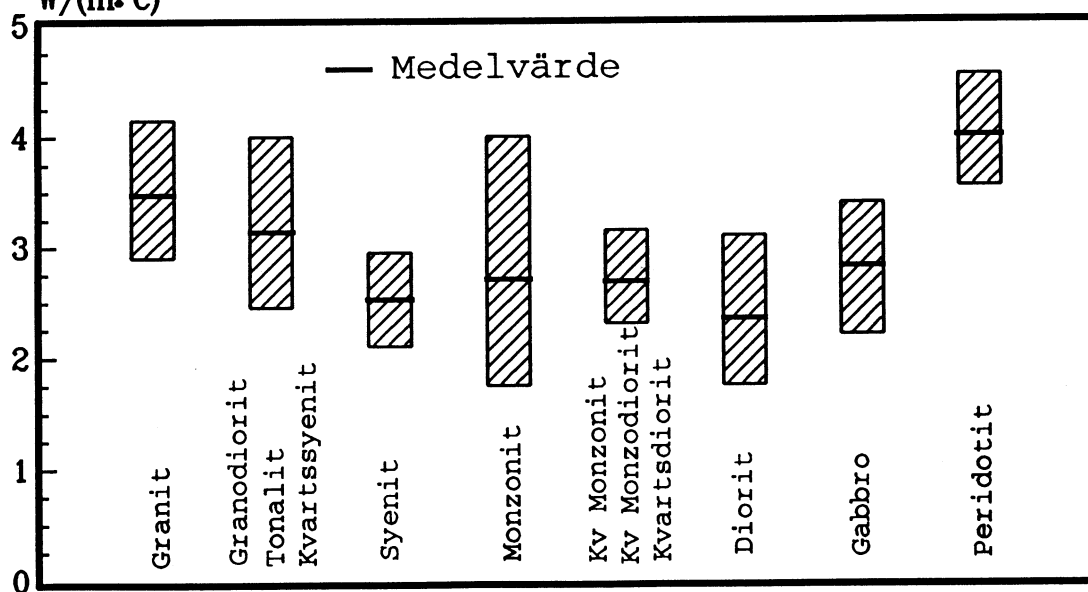


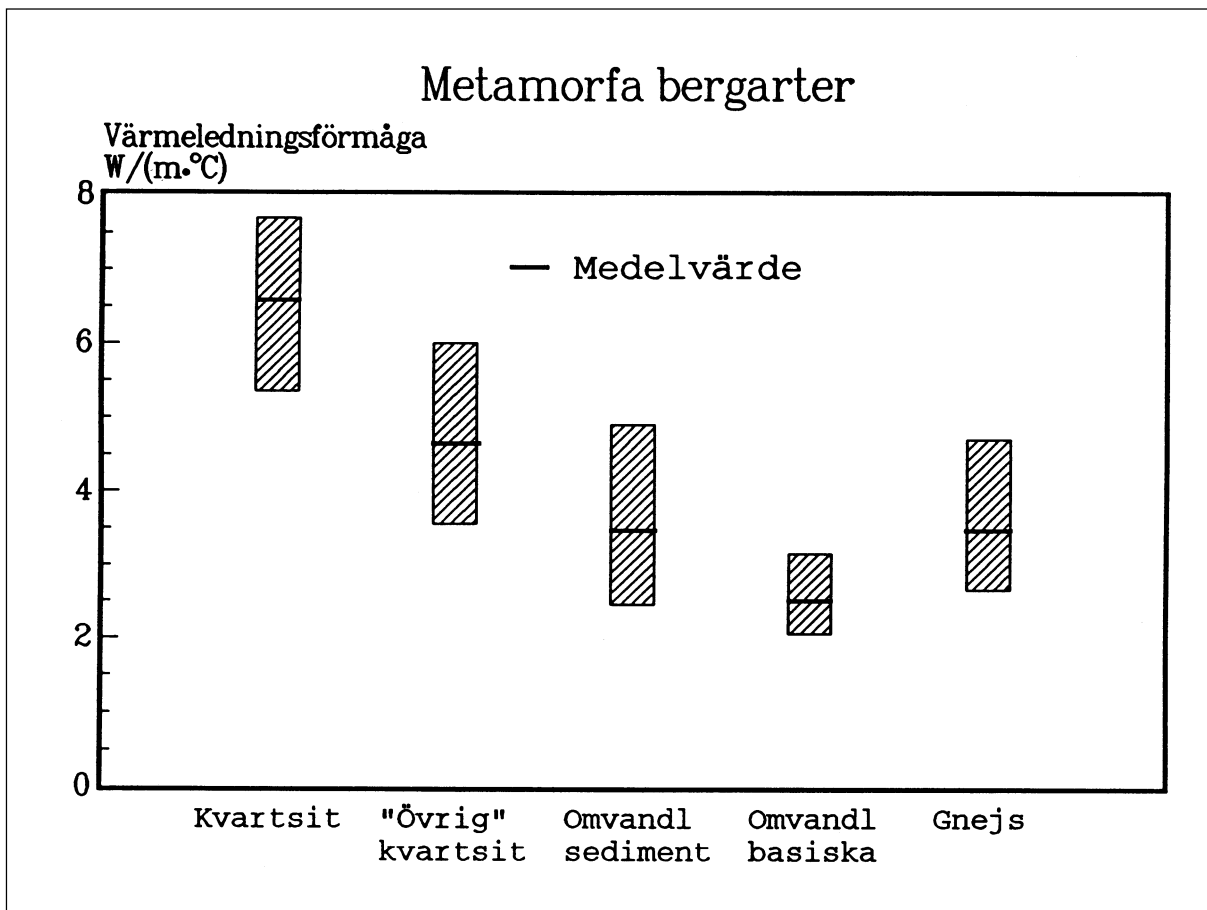
Figur 8. Ungefärlig värmeledningsförmåga för några vattenmättade sedimentära bergarter.

Figur 9. Värmeledningsförmågans variation för olika magmatiska bergarter.

Magmatiska bergarter

Värmeledningsförmåga
W/(m·°C)





Figur 10. Värmeledningsförmågans ungefärliga variation för olika metamorfa bergarter.

ningen. För majoriteten av bergarterna (gnejs och omvandlade sediment) är värmeledningsförmågan inom intervallet drygt 2 till knappt 5 $W/(m \cdot ^\circ C)$. Omvandlade basiska bergarter har en relativt låg värmeledningsförmåga. Kvartsit, som nästan uteslutande består av mineralet kvarts, har en förhållandevis hög värmeledningsförmåga. Med "övrig" kvartsit avses bergarter som ofta betecknats och karterats som kvartsit men som definitionsmässigt har en för låg kvartshalt.

Omvandlade bergarter är vidare mer eller mindre anisotropa vilket innebär att dess egenskaper är olika i olika riktningar, se vidare avsnitt 3. Hänsyn till anisotropi är inte tagen i **Figur 10** varför variationsområdet sannolikt är större.

Figur 9 och **10** baseras på ett stort antal beräkningar av värmeledningsförmågor från bergarters mineralfördelning. Intervallen är formade så att de med 95 % sannolikhet innehåller 90 % av värmeledningsförmågorna.

Flertalet av de hydrogeologiska länskartorna redovisar bedömda termiska egenskaper för olika bergartstyper. Kartblad finns utgivna eller är under utarbetning för större delen av södra och mellersta Sverige.

Värmekapaciteten för de flesta kristallina bergarter brukar anges till ca $0,55 \text{ kWh}/(m \cdot ^\circ C)$. Det finns dock även för värmekapacitet ett mineralberoende men som inte är lika stort som för värmeledningsförmåga.

3. Termiska egenskaper – Några viktiga faktorer

Vattenhalt
Porositet
Mineralsammansättning
Temperatur
Anisotropi och inhomogenitet

Det finns en rad faktorer som påverkar värmetransporten i jord och berg. En del är av större betydelse medan andra vanligen kan bortses ifrån. Följande uppställning försöker gradera dessa faktorerers inverkan för jord och kristallint berg (låg porositet). Sedimentärt berg intar här en mellanställning.

Faktor	Jord	Berg
Vattenhalt	Mycket Stor	Liten
Porositet	Stor	Liten
Mineralsammansättning	Liten-Stor	Mycket Stor
Temperatur	Liten-Mycket Stor ¹⁾	Stor ²⁾
Anisotropi	Liten-Stor	Liten-Stor

¹⁾ Mycket stor vid övergång från fruset tillstånd och vid hög temperatur.

²⁾ Stor påverkan först inom ett stort temperaturområde.

Vattenhalt

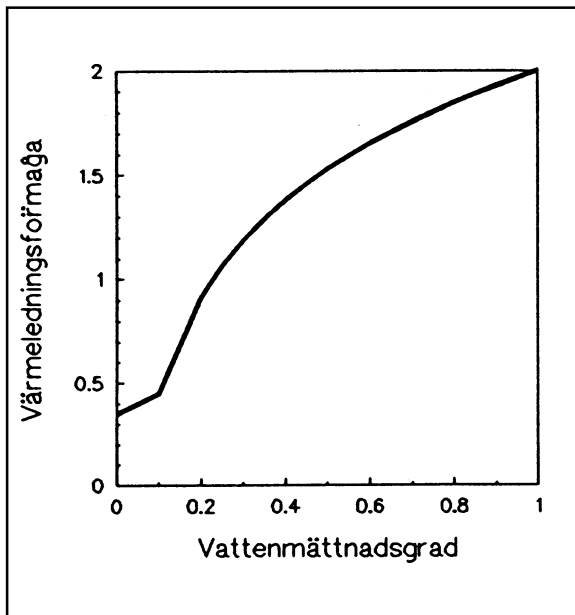
För ett poröst material är vatteninnehållet en viktig parameter för värmeledningsförmågan och värmekapaciteten. Värmeledningsförmågan för vatten (ca 0,6 W/m °C) är betydligt högre än för luft (0,024 W/m °C). Vid fuktning av en torr jord innebär detta att kontakten mellan de väl ledande mineralkornen (2 – 7 W/m °C) kraftigt förbättras. Ökningen är störst vid låg vattenhalt för att minska upp mot full vattenmättnad enligt **Figur 11**.

Under grundvattenytan är jord- och bergarter vattenmättade. Ovan grundvattenytan beror vatten-

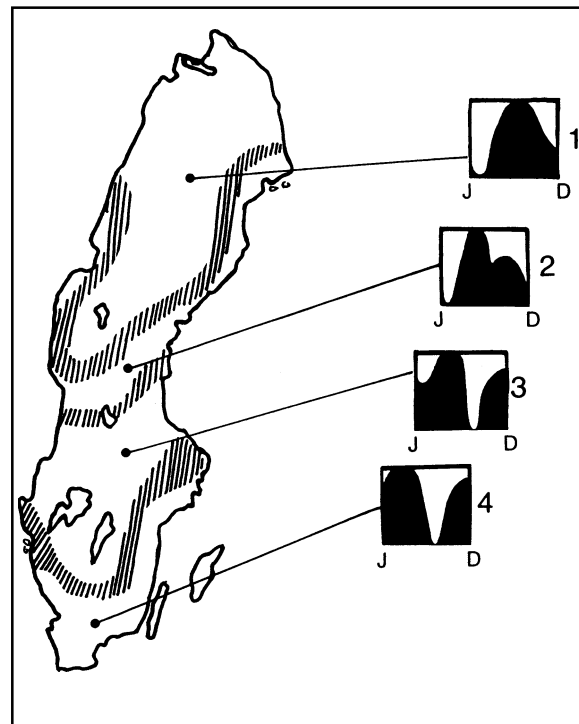
innehållet av hur god vattenhållande förmåga jorden har. En finkornig jordart som lera kan i princip inte dräneras fullständigt medan en sand eller ett grus förlorar nästan allt vatteninnehåll redan någon dm ovan grundvattenytan.

Vid jämvikt mellan ett materials vatteninnehåll och dess förmåga att hålla vatten kan diagram ritas upp som visar de termiska egenskapernas variation med nivån ovan grundvattenytan, se **Figur 12** och **13**.

Beroende på bl.a. nederbördsförhållanden och avdunstning varierar grundvattenytans nivå under

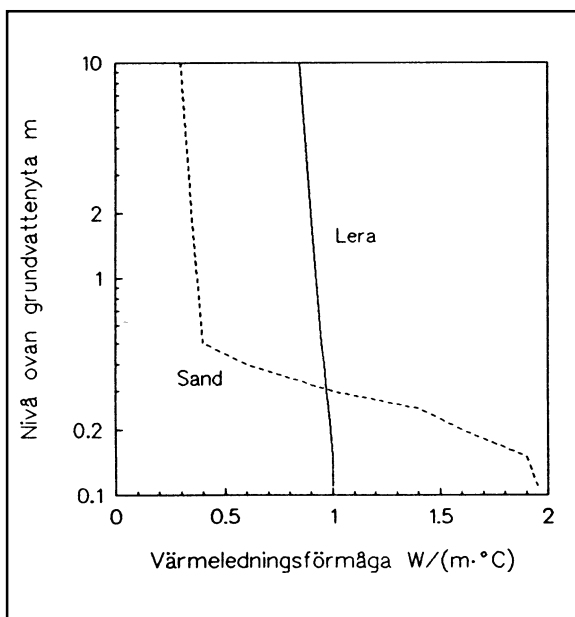


Figur 11. Värmeledningsförmågans principiella variation med vattenmättnadsgraden.

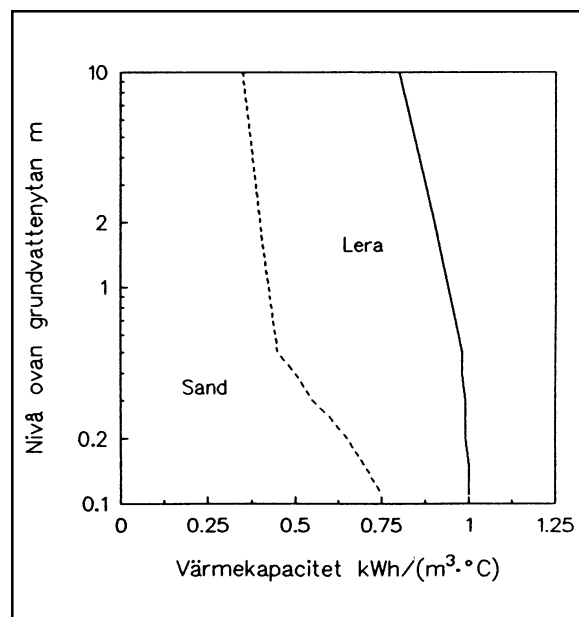


Figur 14. Det principiella utseendet av grundvattenytans variation under året (SGU, Grundvattennätet).

året. Detta innebär att en liten jordvolym vid en viss nivå i en jordprofil kan ha skilda termiska egenskaper under året till följd av olika vattenhalt och fryspåverkan. I **Figur 14** visas huvuddragen i grundvattenytans variation under året i olika delar av landet.



Figur 12. Värmeledningsförmågans variation med höjd över grundvattenytan (princip).



Figur 13. Värme kapacitetens variation med höjd över grundvattenytan (princip).

Porositet

Porositeten för en jord- eller bergart inverkar kraftigt på värmeledningsförmågan och värmekapaciteten. Med porositet menas här jordens totala porositet till skillnad från den för vatten-transport effektiva porositeten. En högre porositet medför generellt sett en lägre värmeledningsförmåga och en högre värmekapacitet, det sistnämnda vid vattenmättnad. Porositeten för *jordarter* kan variera från ca 15 % (bottenmorän) till ca 95 % (torv). *Sedimentära bergarter* i Sverige har ofta porositeter mellan 5 och 15 % men kan variera från någon enstaka procent upp till ca 50 %.

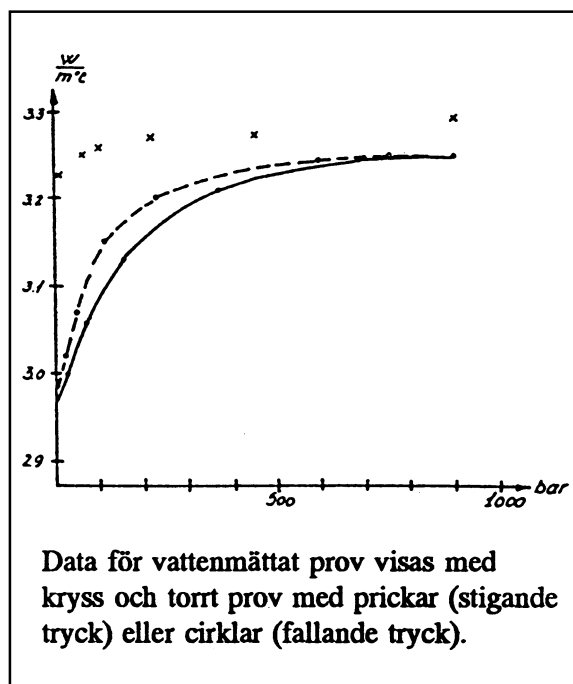
Porositeten för *kristallina bergarter* är i allmänhet låg, endast någon procent. Huvuddelen av porutrymmet består av mikrosprickor, vilka stängs under tryck. Sprickor fungerar som barriärer för värmeflödet. Är sprickorna vattenfyllda blir effekten liten medan dränerade (torra) sprickor påverkar värmeflödet i relativt hög grad. **Figur 15** illustrerar skillnaden i värmeledningsförmåga för ett torrt och ett vattenmättat prov vid olika tryck. Skillnaden blir liten om provet är vattenmättat.

De lokala och regionala spricksystem som genomkorsar en bergart påverkar också värmetransporten. Detta diskuteras under avsnittet "anisotropi".

Mineralsammansättning

Skillnad i mineralsammansättning ger upphov till olika värmeledningsförmåga för både jord- och bergarter. Mineralens värmeledningsförmåga inverkar dock i betydligt högre grad för en kristallin bergart än för en jordart. Generellt kan man säga att mineralsammansättningens inverkan på värmeledningsförmågan minskar i takt med att porositeten ökar. Värmekapaciteten påverkas i betydligt mindre grad. **Tabell 2** visar värmeledningsförmågan för några vanliga bergartsbildande mineral. För några mineral varierar värmeledningsförmågan med dess kemiska sammansättning.

Det mineral som har störst betydelse för värmeledningsförmågan av de vanliga bergartsbildande mineralen är kvarts. Samband mellan kvartsinnehåll och värmeledning för kristallina bergarter redovisas i **Figur 16**. Figuren ger möjlighet till en relativt god bestämning av värmeledningsförmågan med kännedom om kvartshalten (Sundberg et al, 1985).



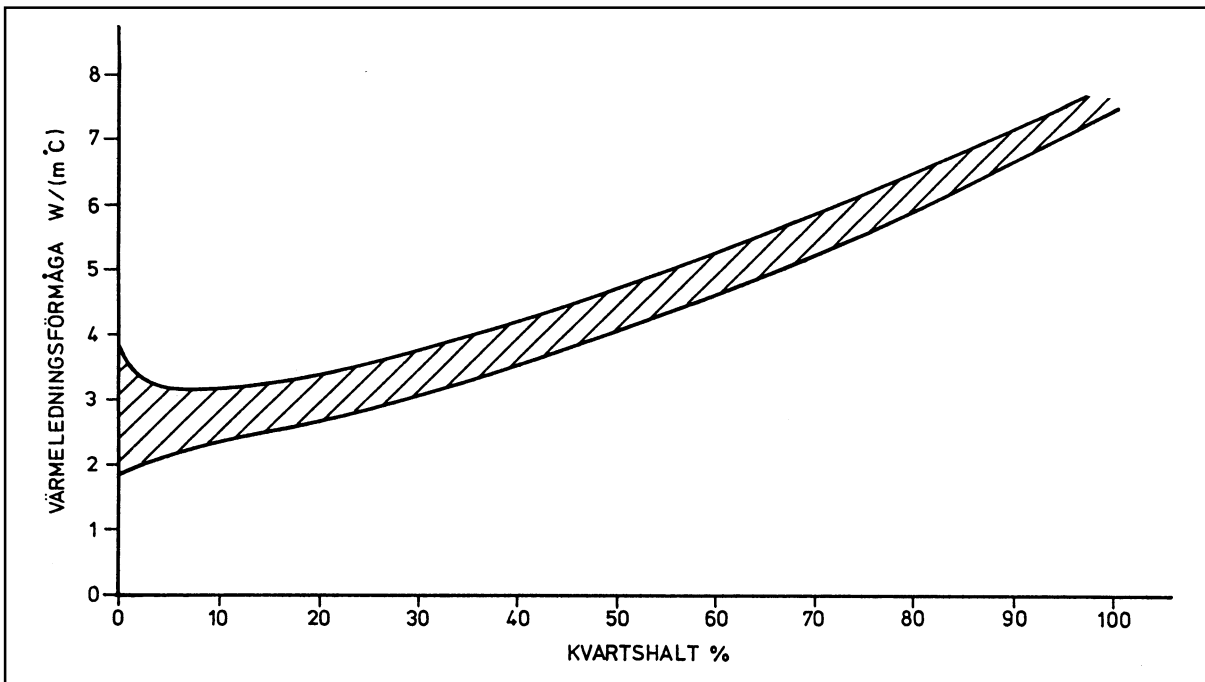
Figur 15. Värmeledningsförmåga för ett granitprov under axiellt tryck (Walsh & Decker, 1966).

Tabell 2. Värmeledningsförmåga för några vanliga bergartsbildande mineral (Horai, 1971).

Mineral	Värmeledningsförmåga (W/m · °C)
Kvarts	7,7
Kalifältspat	2,5
Plagioklas ¹⁾	1,8 (1,5-2,3)
(sur-intermed: 1,8, basisk: 1,6) ²⁾	
Biotit	2,0
Muskovit	2,3
Olivin ¹⁾	4,1 (3,1-5,1)
(Basisk: 4,1, ultrabasisk: 4,8) ²⁾	
Pyroxen ¹⁾	3,8 (3,1-4,7)
(Basisk: 3,8, ultrabasisk: 4,3) ²⁾	

¹⁾ Värmeledningsförmågan beror av kemisk sammansättning.

²⁾ Ungefärliga värden för olika bergartstyper.

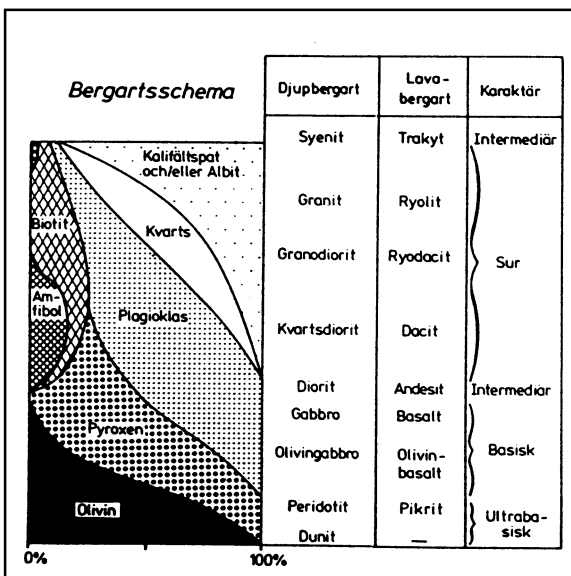


Figur 16. Samband mellan värmeledningsförmåga och kvartshalt för kristallina bergarter. Värmeledningsförmågan är beräknad från den totala mineralsammansättningen.

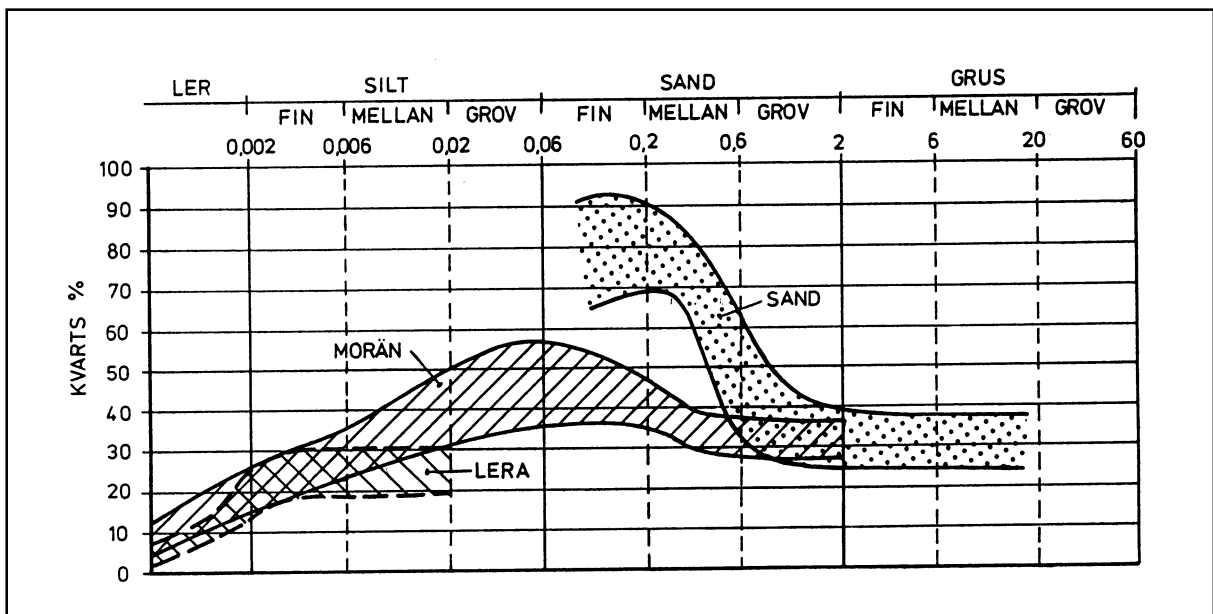
Mineralsammansättningen för några vanliga magmatiska bergarter framgår av **Figur 17**. Den vanligaste bergarten i Sverige, granit, har ett kvartsinnehåll mellan 20 – 40 %.

Beträffande jordarters mineralsammansättning finns få undersökningar utförda. Ett samband finns dock mellan kornstorlek och kvartsinnehåll. **Figur 18** visar det ungefärliga variationsområdet för ett antal jordprover från olika delar av Sverige och från våra nordiska grannländer. Med hjälp av **Figur 18** och uppgifter om kornstorleksfördelningen (ex. se **Figur 23**) för aktuell jordart kan ett totalt kvartsinnehåll beräknas. Kvartsinnehållet beräknas så att produkten av andelen material och kvartsinnehållet inom varje kornstorleksintervall summeras.

Kvartsinnehållet är sålunda störst i en finsand, upp mot 90 %, för att gå ner mot noll i lerfraktionen för en lera. Kvartsinnehållet i en morän har inte så stor spridning. Det visar sig att den totala kvartshalten vanligen blir ungefär 25 – 35 %, oavsett kornstorleksfördelning.



Figur 17. Schema över magmatiska bergarter med ungefärlig mineral-sammansättning (Loberg, 1980).



Figur 18. Variationsområdet för kvarts i olika jordarter som funktion av kornstorleken.

Temperatur

För en jordart inverkar temperaturen på de termiska egenskaperna främst vid temperatur under 0°C och vid hög temperatur under omänskade förhållanden. **Tabell 3** visar termiska egenskaper för vatten och is. Värmeledningsförmågan ökar med en faktor fyra och värmekapaciteten halveras vid en övergång från vatten till is. Dessutom frigörs värme vid övergången som motsvarar en temperatursänkning av motsvarande mängd vatten med 80°C. Porositeten och vattenmättnadsgraden är avgörande för hur stor påverkan som erhålls för en specifik jordart, se **Figur 5-7**.

I finkorniga jordarter fryser inte allt vatten vid 0 °C beroende på att vattnet är så hårt bundet till partiklarna och porsystemet (jämför vattenhållande egenskaper under avsnittet vattenhalt). En lera innehåller ofruset vatten fortfarande vid 20 minusgrader.

Vid ökad temperatur över ca 25 °C erhålls, i omänskade jordarter, ett allt större bidrag till värmetransporten från ångdiffusion. Tillsammans med den "vanliga" värmeledningsförmågan kan detta tillskott ses som en "fiktiv värmeledningsförmåga". **Figur 19** visar inverkan av ångdiffusionen på den "fiktiva värmeledningsförmågan" för fuktig sand vid ökad temperatur.

Vid ökad temperatur i bergarter minskar värmeledningsförmågan i kristallint berg med ca 5 – 15 % vid en ökning av temperaturen från 0 till 100°C, se t ex **Figur 20**. Värmekapaciteten ökar med ökande temperatur, ca 5 % mellan 25 och 50 °C och 10 % mellan 100 och 200 °C.

Figurerna i avsnitt 2 avser naturlig marktemperatur.

Tabell 3. Fysikaliska egenskaper för vatten och is.

Värmeledningsförmåga W/m · °C		Värmekapacitet kWh/m ³ · °C		Latent värme kWh/m ³	Densitet kg/m ³	
vatten	is	vatten	is		vatten	is
0,57	2,1	1,16	0,61	93	1000	917

