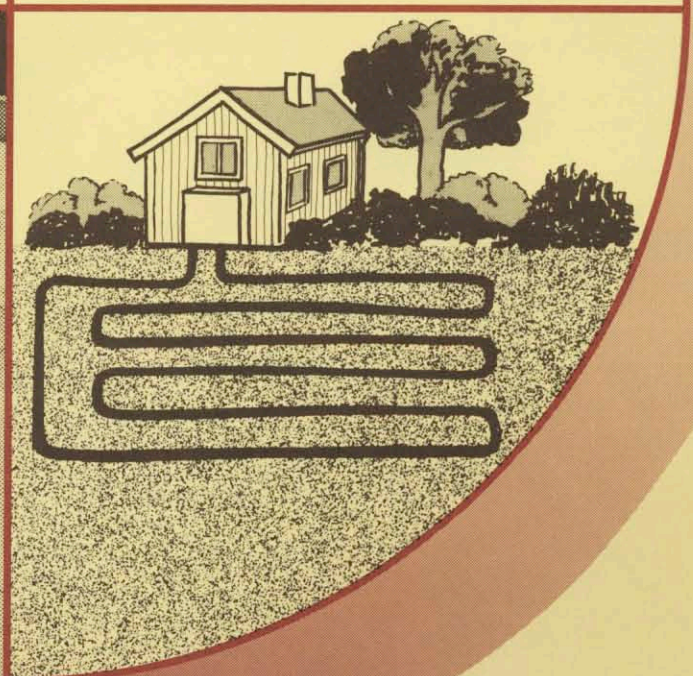
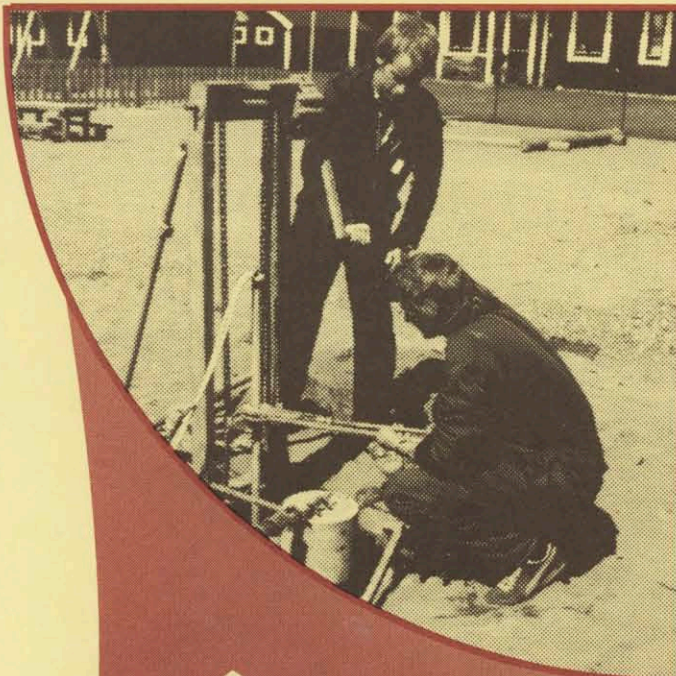
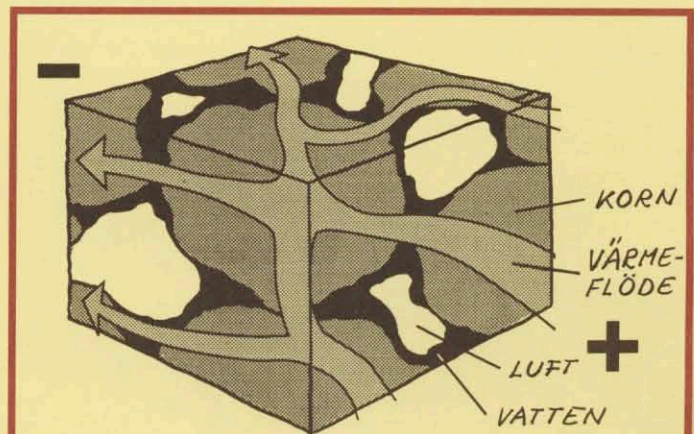


Termiska egenskaper i jord och berg

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

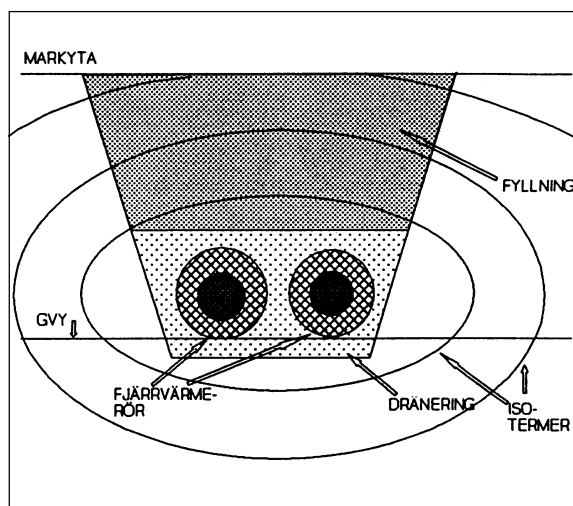
Känedom om de termiska egenskaperna för jord och berg är nödvändiga i flera sammanhang. Några exempel är utvinning och lagring av energi i mark, beräkning av tjalningsprocessen i mark samt bestämning av värmeförluster från elkablar, värmekulvertar och byggnader.

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.

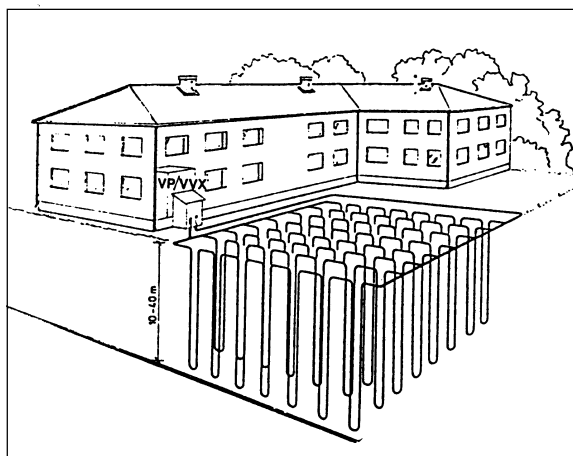
Markförlagda elkablar är i behov av god bortledning av producerad värme för att undvika en oacceptabelt hög temperatur och termisk kollaps av kabeln. Förläggning i vissa jordarter kan medföra att en uttorkning av jorden sker närmast kabel varpå värmemotståndet i jorden, och därmed också temperaturen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

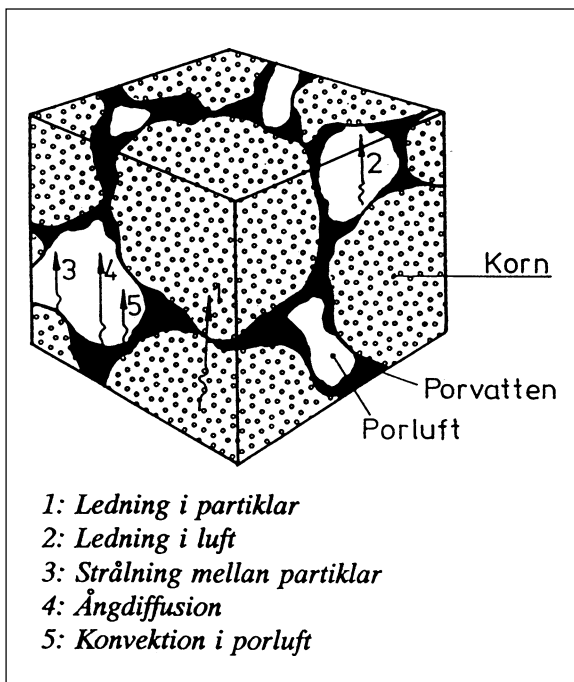
¹ Värmekapaciteten C kan också skrivas som produkten $\rho \cdot c$, där ρ är densitet (kg/m^3) och c är värmekapacitet per viktsenhet ($kWh/(kg \cdot ^\circ C)$).

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

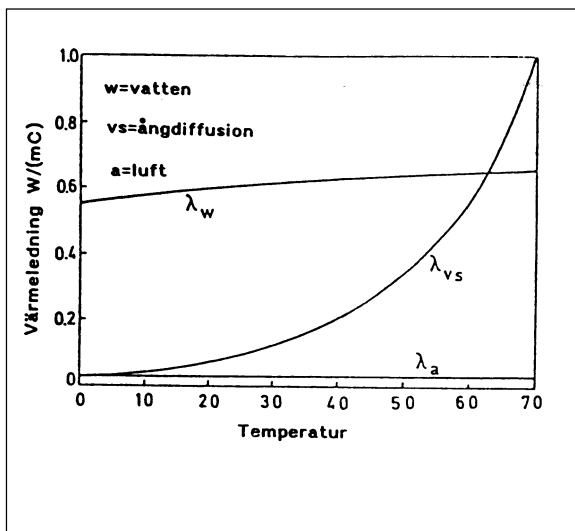
Vattenhalt och porositet är två viktiga parametrar för värmeledningens effektivitet. Låg porositet (hög densitet) innebär att kornen, som leder värme bra, kommer närmare varandra (extremfallet är en bergart). Ökande vatteninnehåll innebär att kontakten mellan kornen förbättras (vatten är ca 20 ggr bättre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

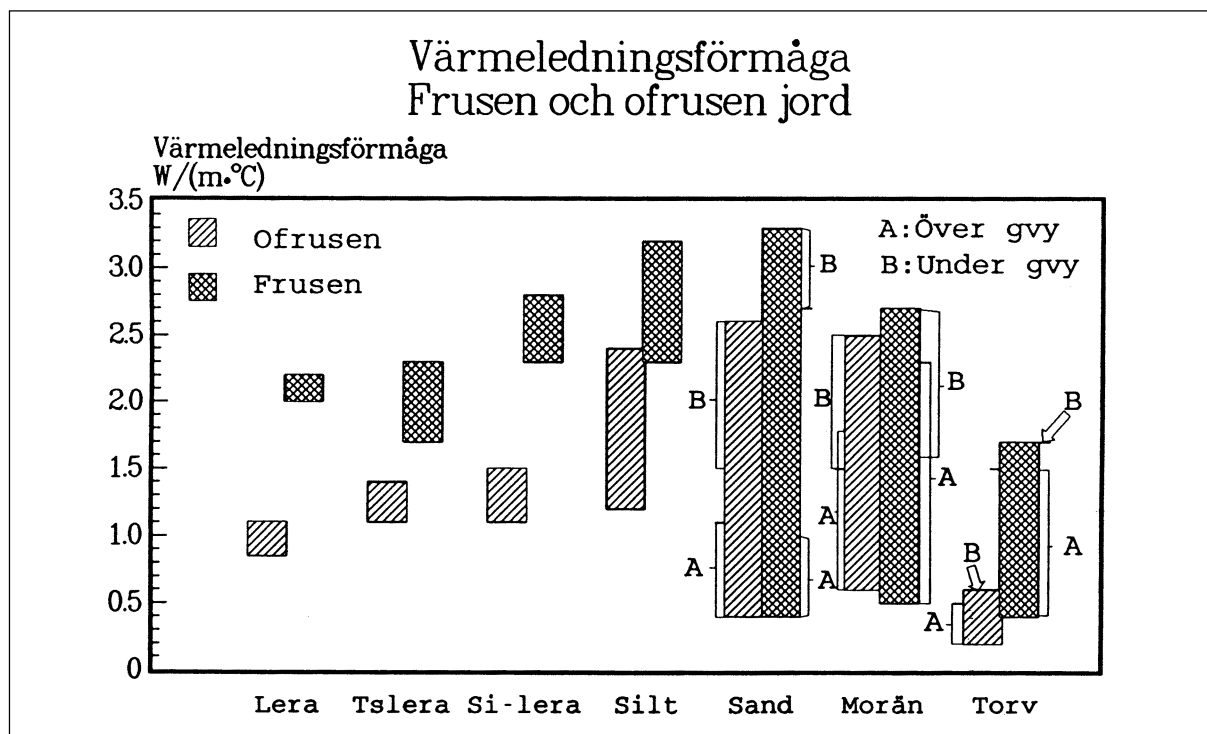
STRÅLNING

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 %.

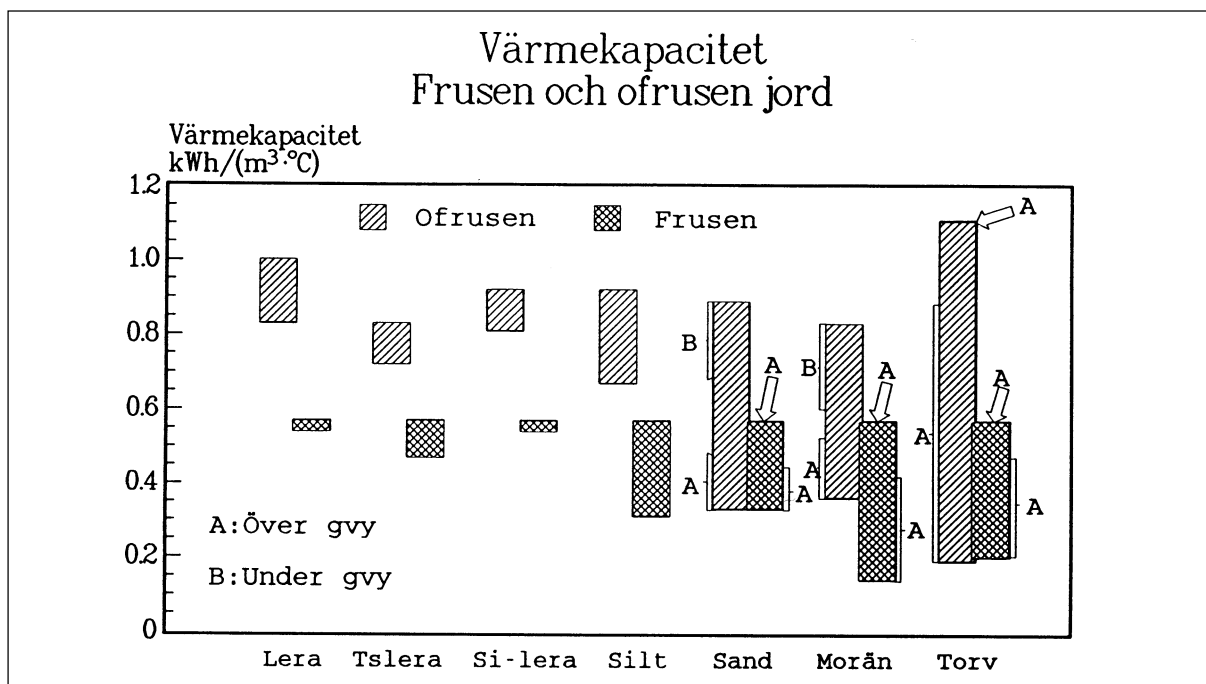
Termiska egenskaper i jord

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.

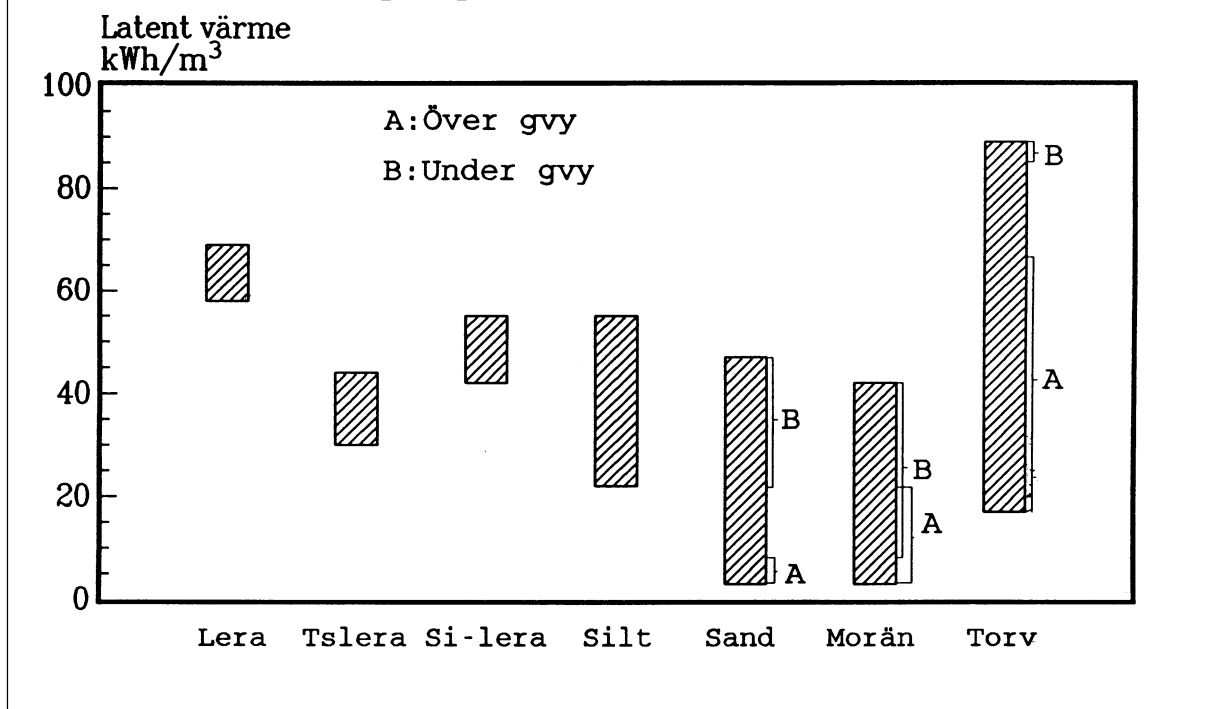
Figureerna visar också att värmeledningsförmågan ökar vid *fruset tillstånd* om jorden är relativt vattenmättad. Vidare framgår att ett vattenmättat jordmaterial i fruset tillstånd kan leda värme upp till åtta gånger bättre än motsvarande ej frusna material ovan grundvattenytan. För finkorniga jordar 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

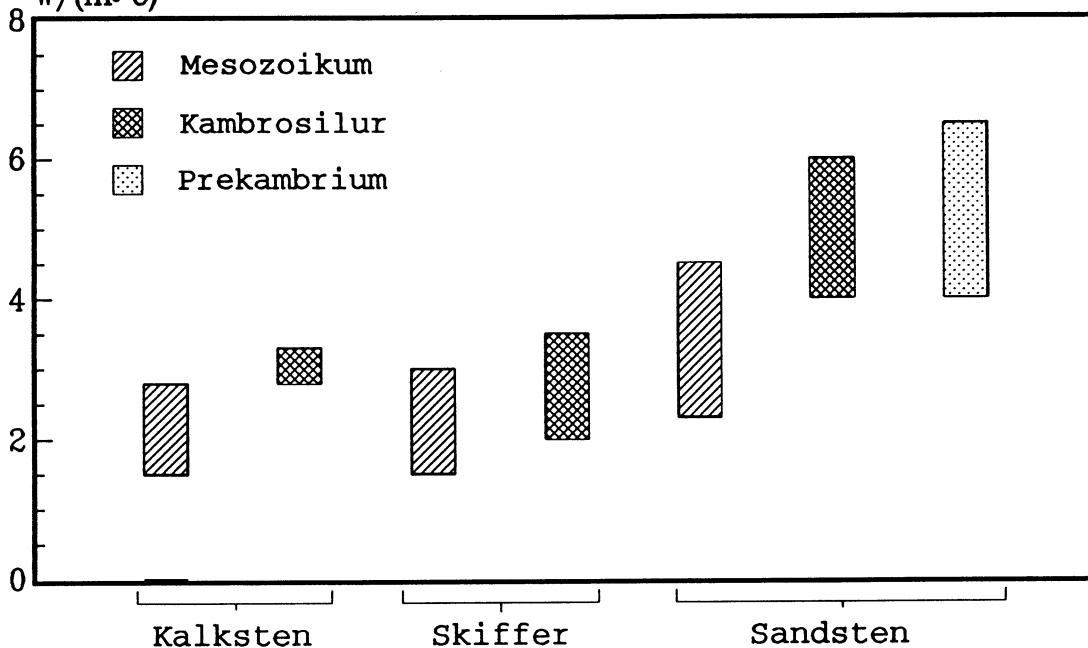
Mineralinnehållet är den viktigaste faktorn för värmeledningsförmågan i kristallint berg. Ett högt kvartsinnehåll ger en hög värmeledningsförmåga. Kristallint berg indelas i magmatiska och metamorfa bergarter. I **Figur 9** ges variationsområdet för några *magmatiska* bergarter.

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)

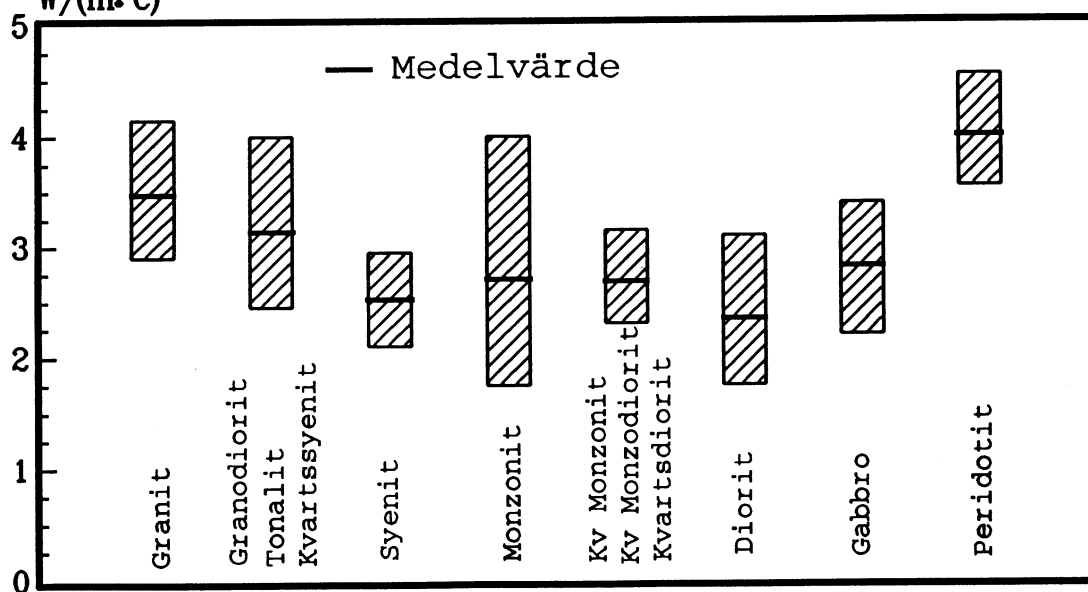


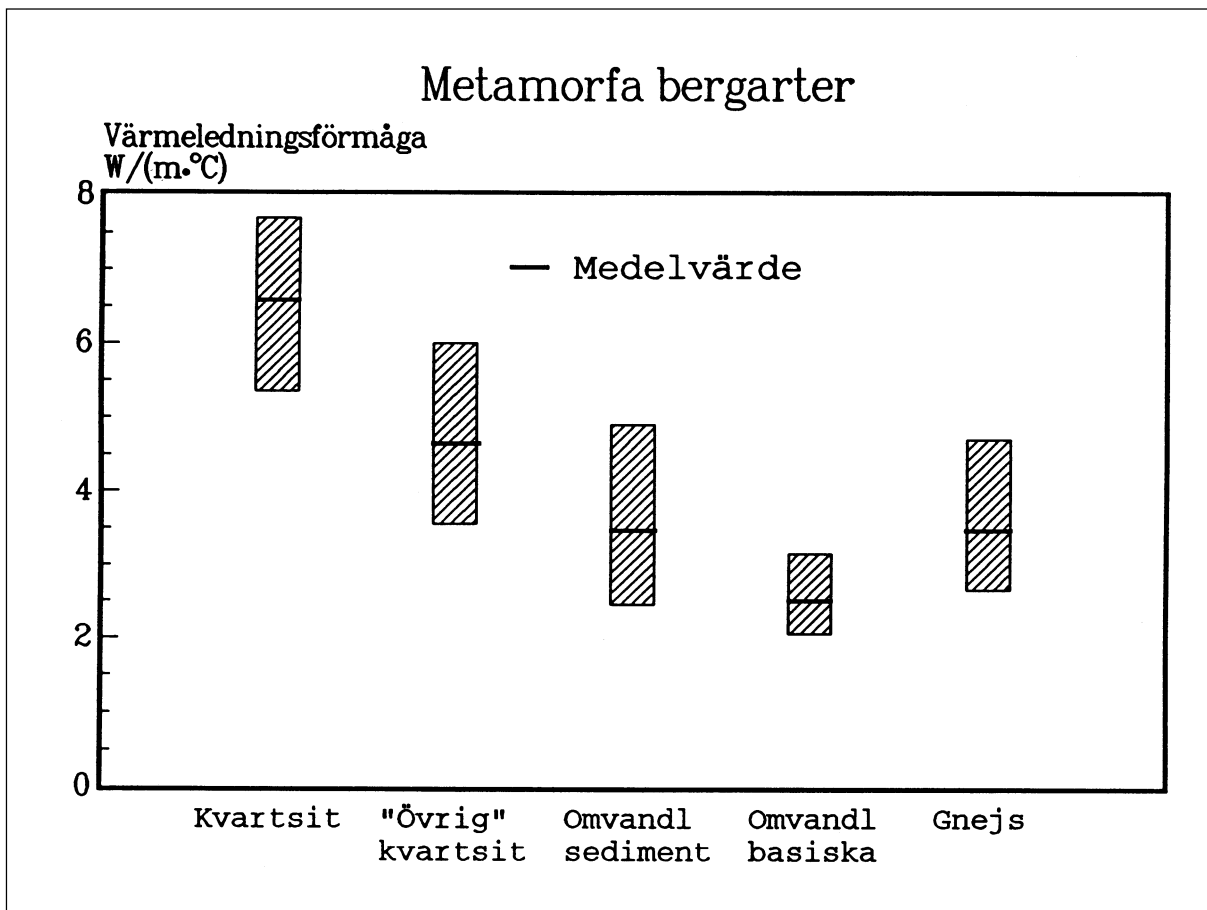
Figur 8. Ungefärlig värmeledningsförmåga för några vattenmättade sedimentära bergarter.

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

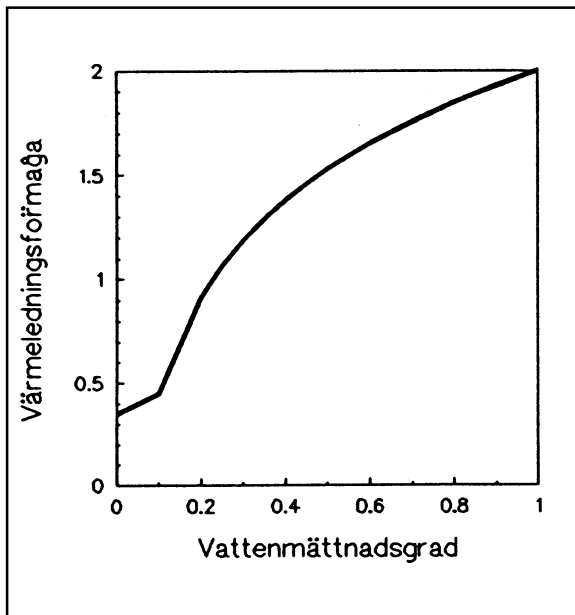
För ett poröst material är vatteninnehållet en viktig parameter för värmeledningsförmågan och värmekapaciteten. Värmeledningsförmågan för vatten (ca 0,6 W/m °C) är betydligt högre än för luft (0,024 W/m °C). Vid fuktning av en torr jord innebär detta att kontakten mellan de väl ledande mineralkornen (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-

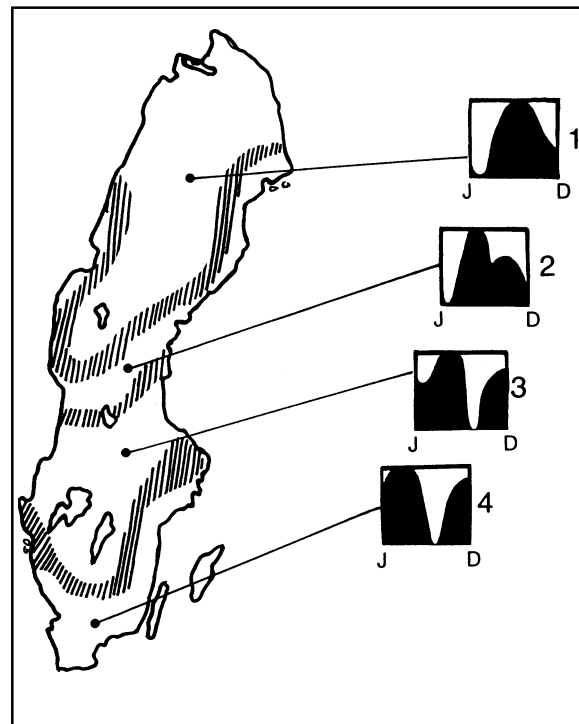
innehållet av hur god vattenhållande förmåga jorden har. En finkornig jordart som lera kan i princip inte dräneras fullständigt medan en sand eller ett grus förlorar nästan allt vatteninnehåll redan någon dm ovan grundvattenytan.

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

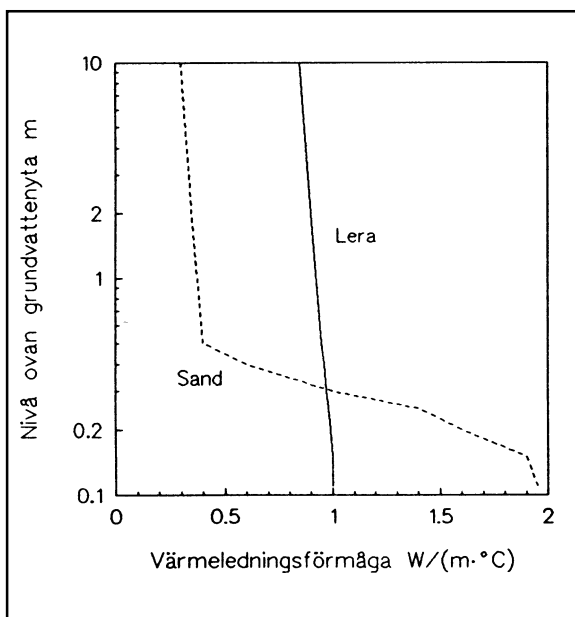


Figur 11. Värmeledningsförmågans principiella variation med vattenmättnadsgraden.

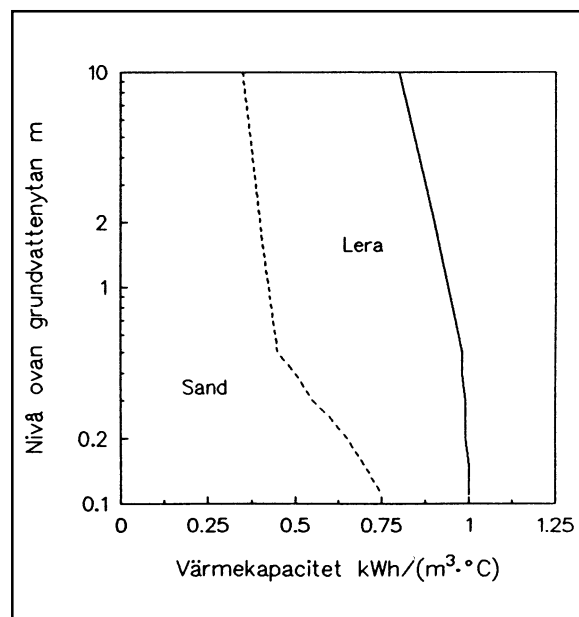


Figur 14. Det principiella utseendet av grundvattenytans variation under året (SGU, Grundvattennätet).

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 %.

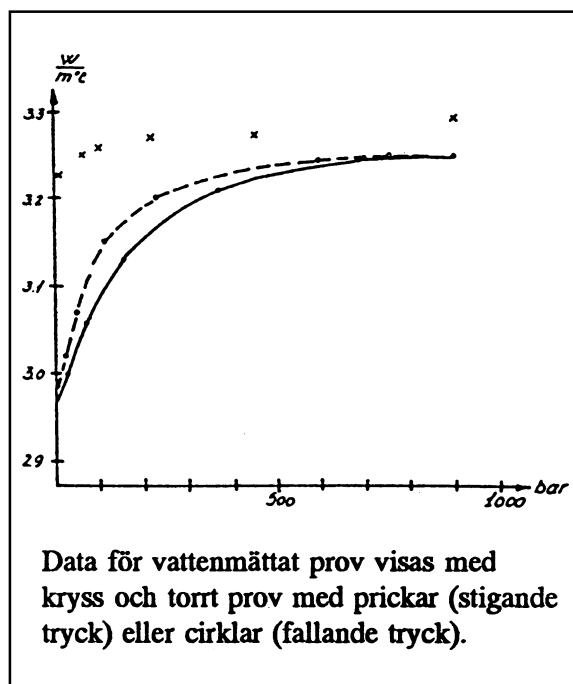
Porositeten för *kristallina bergarter* är i allmänhet låg, endast någon procent. Huvuddelen av porutrymmet består av mikrosprickor, vilka stängs under tryck. Sprickor fungerar som barriärer för värmeledningen. Är sprickorna vattenfyllda blir effekten liten medan dränerade (torra) sprickor påverkar värmeledningen 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 värmeledningen. 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).



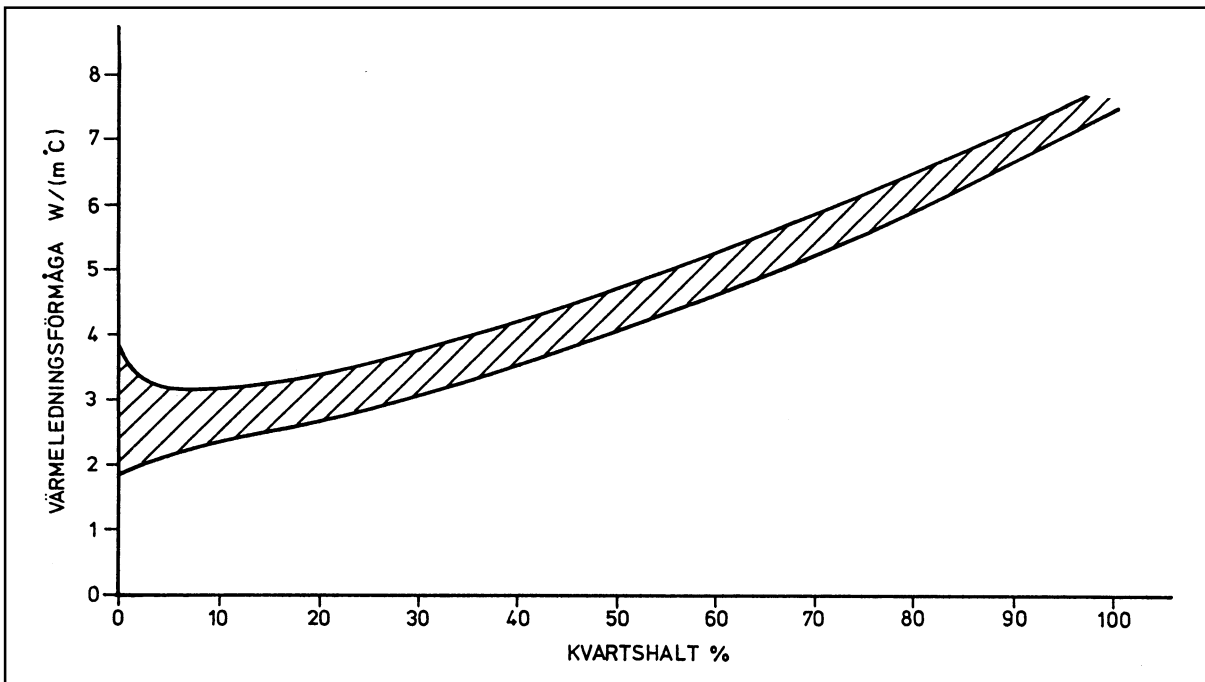
Figur 15. Värmeledningsförmåga för ett granitprov under axiellt tryck (Walsh & Decker, 1966).

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.

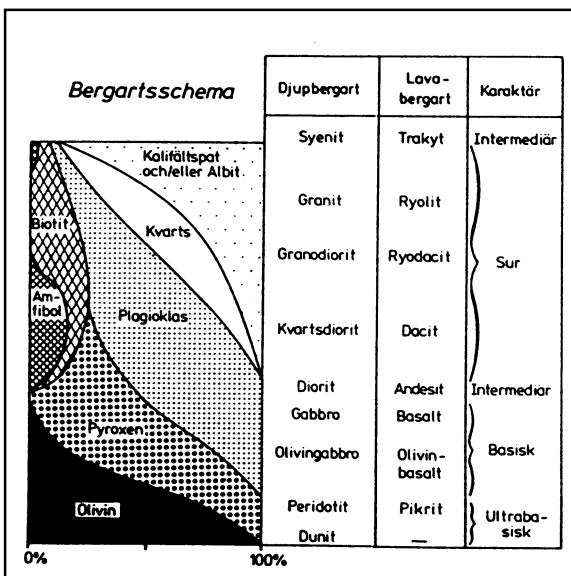


Figur 16. Samband mellan värmeledningsförmåga och kvartshalt för kristallina bergarter. Värmeledningsförmågan är beräknad från den totala mineralsammansättningen.

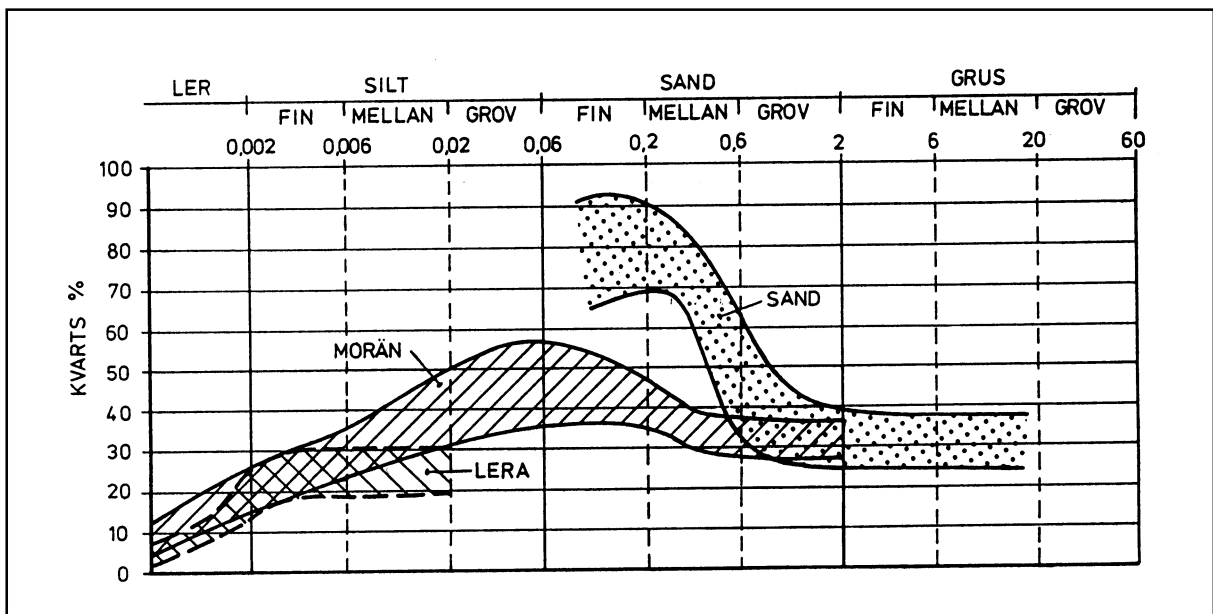
Mineralsammansättningen för några vanliga magmatiska bergarter framgår av **Figur 17**. Den vanligaste bergarten i Sverige, granit, har ett kvartsinnehåll mellan 20 – 40 %.

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.

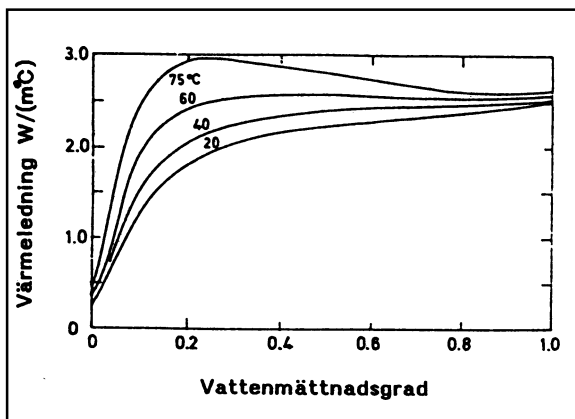
Vid ökad temperatur över ca 25 °C erhålls, i omänskade jordarter, ett allt större bidrag till värmetransporten från ångdiffusion. Tillsammans med den "vanliga" värmeledningsförmågan kan detta tillskott ses som en "fiktiv värmeledningsförmåga". **Figur 19** visar inverkan av ångdiffusionen på den "fiktiva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

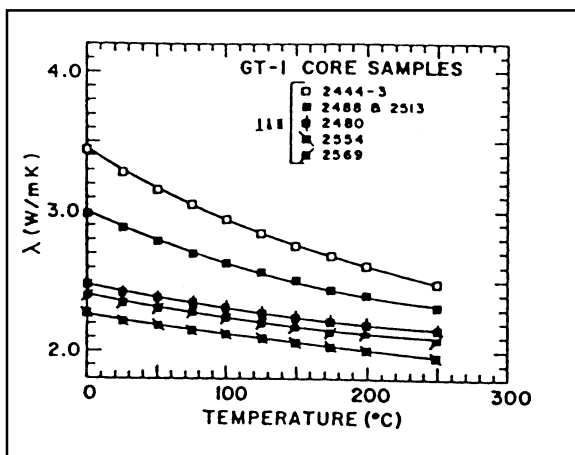
Figurerna i avsnitt 2 avser naturlig marktemperatur.

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



Figur 19. "Fiktiv värmeledningsförmåga" i fuktig sand vid bidrag av ångdiffusion vid olika temperatur (efter de Vries, 1952).



Figur 20. Värmeledningsförmåga som funktion av temperatur för granit (de övre två kurvorna) och amfibolit (undre två) (Sibbit et al, 1979).

Anisotropi

och inhomogenitet

Ett material är isotropt om det har samma egenskaper i alla riktningar. Ett anisotropt medium har sålunda ett *riktningsberoende*. I **Figur 21** blir därför isothermerna elliptiska eftersom det skikt som har lägst ledande förmåga kommer att verka isolerande för värmetransporten i y-led. På motsvarande sätt kommer det högst ledande skiktet att få en dominerande inverkan på värmetransporten i x-led och därmed öka värmetransporten i denna riktning.

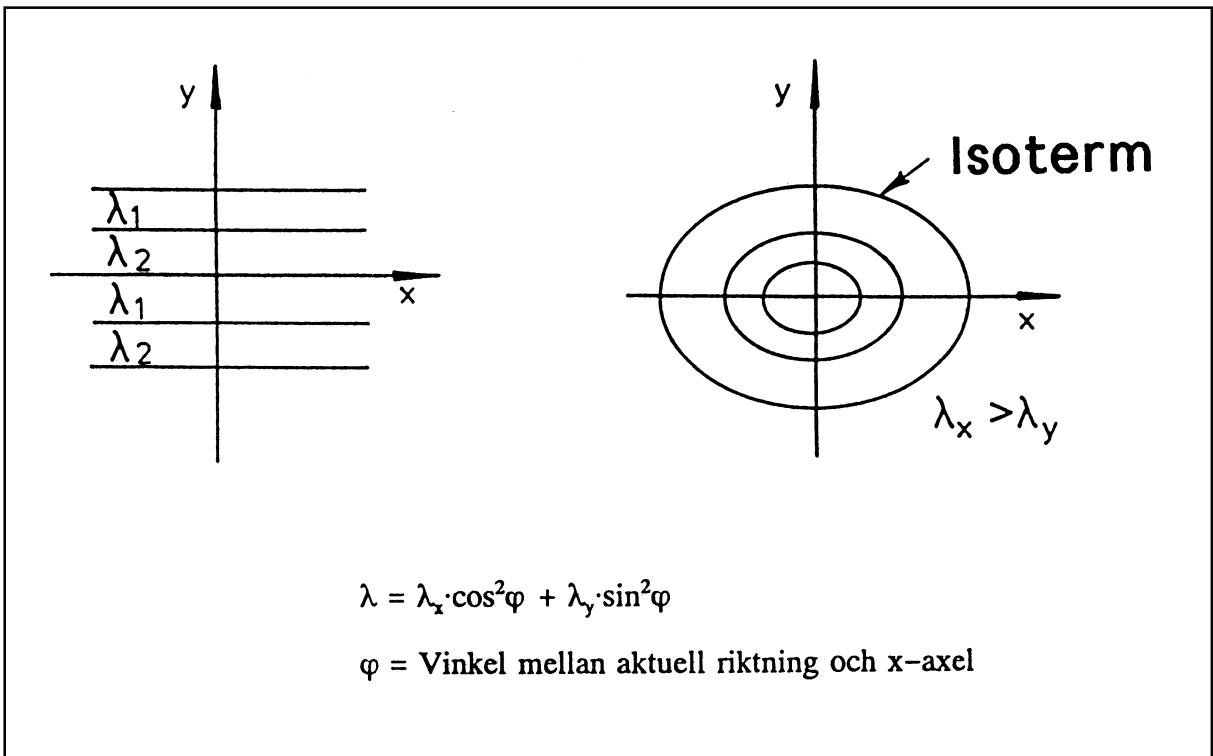
Alla jord- och bergarter som på något sätt sorterats vid bildandet (ex lera, sand, sandsten, skiffer) är mer eller mindre anisotropa. Förhållandet är mer påtagligt för bergarter. Anisotropa bergarter kan också bildas vid högt ensidigt tryck och hög temperatur (ex gnejs, skiffer).

Värmekapaciteten är oberoende av eventuell anisotropi eftersom denna är en parameter som beskriver ett materials värmelagringsfunktion som inte är riktningensberoende.

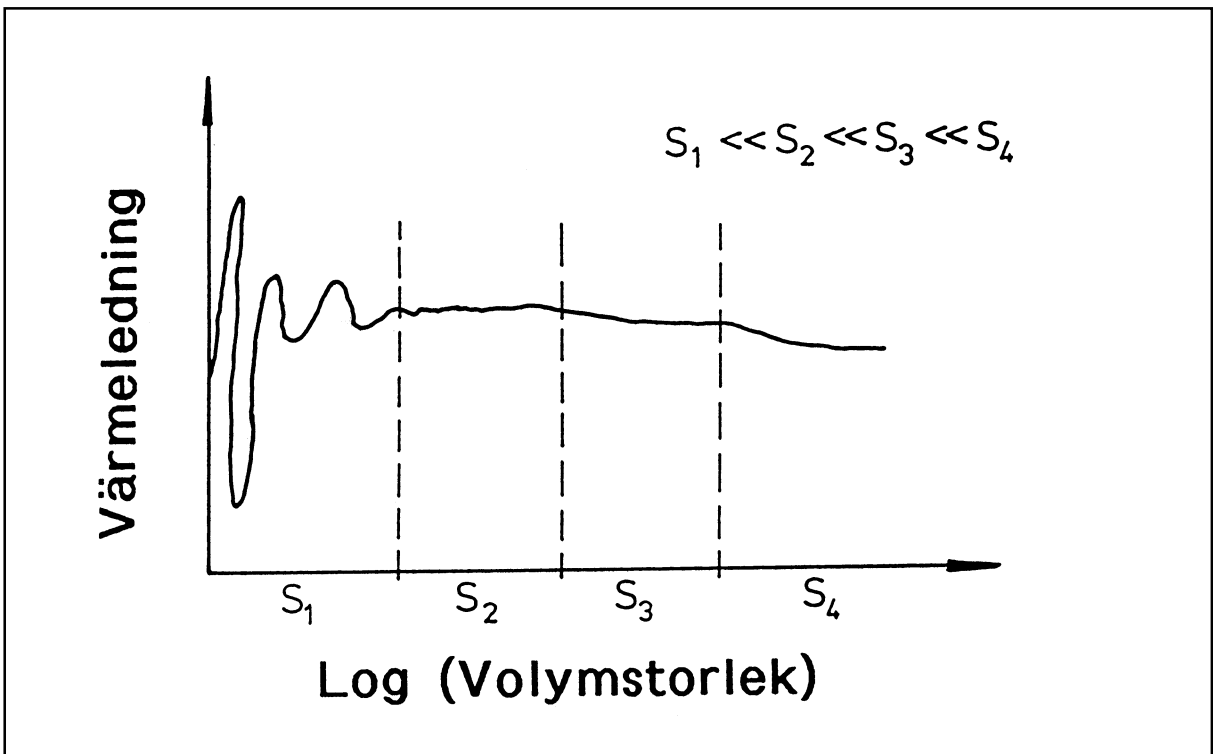
Ett material som är inhomogent har olika termiska egenskaper i olika delområden. Om en bestämning ska vara representativ för en större jord- eller bergmassa krävs att den volym som bestämningen görs inom är tillräckligt stor. Alternativt får ett antal bestämningar göras.

Det *representativa volymselementet* (REV) definieras som det volymselement vars egenskaper förblir oförändrade när volymen ökas något. REV för en bergart måste sålunda innehålla tillräckligt många korn för att en statistisk medelvärdesbildning skall kunna utföras, se **Figur 22**. I en normalkornig bergart eller en finkornig jord räcker det med ett par cm^3 för att bilda ett homogent prov.

Det representativa volymselementet kan också vara av en helt annan skala. Om lokala sprickor i en bergart inkluderas ökar REV till en kub med kanske 10 m sida. I en ännu större skala påverkar regionala sprickzoner värmeledningsförmågan. Sprickzoner orienterade vertikalt mot värmeflödet minskar värmetransporten eftersom de fungerar som barriärer för värmeflödet. Sprickzoner är ofta vattenförande och kan därför också transportera värme i vattenflödets riktning.



Figur 21. Temperaturutveckling och värmeledningsförmåga för ett anisotropt medium med värmekällan i centrum.



Figur 22. Värmeledningsförmåga som funktion av storlek på betraktat volymselement.

4. Metoder för bestämning av termiska egenskaper

Mätning

Beräkning

- VÄRMELEDNINGSFÖRMÅGA I VATTENMÄTTAD JORD OCH SEDIMENTÄRT BERG
- VÄRMELEDNINGSFÖRMÅGA I KRISTALLINT BERG
- VÄRMEKAPACITET I JORD OCH BERG
- LATENT VÄRME (ISBILDNINGSVÄRME)

Jord och bergs termiska egenskaper kan bestämmas genom mätning eller beräkning. För bergarter är mätningar i allmänhet att föredra. Finns mineralanalyser för bergarten att tillgå är en beräkning utifrån dessa ett bra komplement.

I jord ger en mätning det bästa resultatet för en aktuell plats och tidpunkt. För ytligt liggande jordlager sker dock en väsentlig förändring av termiska egenskaper under året på grund av vattenhalts- och temperaturförändringar (tjäle). Vidare är provtagning och rutinanalys av jord

enkel att utföra eller nödvändig för andra ändamål varför underlag för en beräkning ofta finns tillgängligt.

I **Tabell 4** finns exempel på några vanliga metoder för bestämning av termiska egenskaper i jord och berg.

Tabell 4. Några vanliga metoder för bestämning av termiska egenskaper.

Metod	Egenskap som ska bestämmas	Kommentar
Sondmetoden	Ledningsförmåga (Diffusivitet)	Transient fält- och laboratoriemetod. Användbar i jord (och berg)
Divid-bar metoden	Ledningsförmåga	Stationär laboratoriemetod. Användbar i berg
Teoretisk beräkning	Ledningsförmåga Värmekapacitet	Beräkning från mineralinnehåll, porositet och vattenhalt. Användbar i jord och berg

Mätning

Mätning av termiska egenskaper i jord kan delas in i fältmätningar (in situ) och laboriemätningar. In situ mätningar görs vid naturliga och ostörda förhållanden. Ett problem vid mätningar är att bedöma mätningens representativitet i förhållande till naturliga förändringar i vattenhalt etc. Om sådana tidsberoende variabler kan värderas på ett relevant sätt är mätningar att föredra framför beräkningar.

I **Figur 23** ses ett exempel på en sond för bestämning av värmeledningsförmåga i laboratorium. Sonden alstrar värme och från samband mellan uppmätt temperatur och tid kan värmeledningsförmågan bestämmas. I berg finns speciella metoder provade för storskaliga mätningar i borrhål.



Figur 23. Sond för bestämning av värmeledningsförmåga.

Beräkning

Beräkning av de termiska egenskaperna för jordmaterial kan göras utifrån andelarna mineral, korn, porgas och porvatten. Det finns flera fördelar med beräkningar framför mätningar eftersom det är möjligt att på ett generellt sätt beräkna förändringen i termiska egenskaper beroende på förändringar i t.ex. temperatur och vattenhalt. En bestämning kan göras utifrån en geoteknisk rutinundersökning (vattenhalt, porvolym etc) och kompletteras med en känslighetsanalys. För berg kan beräkningar göras utgående från mineralsammansättningen.

Ett självinstruerande datorprogram finns utarbetat (se avsnitt 6) som beräknar marks termiska egenskaper utifrån vissa ingångsdata. Programmet innehåller relativt komplicerade beräkningsmetoder som baserar sig på ett stort antal mätningar på i första hand jordarter.

För *överslagsberäkningar* kan det geometriska medelvärdet användas. Ekvationen gäller endast för vattenmättade jord- och bergarter och kan skrivas på några olika sätt beroende på användningsområde.

Olika typ av densitet och vattenhalt m m diskuteras närmare i nästa kapitel.

Tabell 5. Riktvärden för porositet.

Jordart	Porositet
Lera, hög lerhalt	0,60-0,75
Torrskorpelera, dito	0,45-0,55
Lera, siltig	0,45-0,60
Torrskorpelera, dito	0,45-0,55
Silt	0,30-0,60
Sand, grus	0,25-0,50
Moränlera	0,25-0,50
Morän	0,15-0,45
Torv	0,80-0,95

Värmeledningsförmåga i vattenmättad jord och sedimentärt berg

$$\lambda = \lambda_w^n \cdot \lambda_g^{1-n}$$

λ_w = Värmeledningsförmåga för vatten

λ_g = Värmeledningsförmåga för kornen. Saknas uppgift kan värdet 3 W/(m °C) eller nedanstående ekvation utnyttjas.

n = Porositet (se tabell 5)

Värmeledningsförmåga i kristallint berg

$$\lambda = \lambda_{qz}^v \cdot \lambda_{rest}^{1-v}$$

λ_{qz} = Värmeledningsförmåga för kvarts (7,7 W/(m °C))

λ_{res} = Medelledningförmåga för resterande korn (ca 2,4 W/(m °C))

v = Kvartshalt, andel av 1

Värmekapacitet i jord och berg

$$C = C_g \cdot (1-n) + C_w \cdot n \cdot S_r$$

C = Värmekapacitet, kWh/(m³ °C)

C_g = Värmekapacitet för kornen (ca 0,6 kWh/(m³ °C))

C_w = Värmekapacitet för vatten (ca 1,16 kWh/(m³ °C))

n = Porositet (se tabell 5, kan sättas till noll i kristallint berg)

S_r = Vattenmättnadsgrad

Latent värme (Isbildningsvärme)

$$I = I_w \cdot n \cdot S_r$$

I_w = Isbildningsvärme för vatten (ca 93 kWh/m³)

n = Porositet (se tabell 5)

5. Jord- och bergarter

Jords och bergs termiska egenskaper varierar beroende på typ av jord- eller bergart, se avsnitt 2. För att bestämma aktuell marktyp är den geologiska kartan ett bra hjälpmedel. Handboken Bygg, Geoteknik ger bland annat en beskrivning över jord- och bergarter.

Förekomst

Sveriges yta täcks till 75 % av morän. Morän är en jordart som avsatts direkt av isen och innehåller praktiskt taget samtliga kornfraktioner. **Figur 24** visar exempel på några olika moräntyper i ett kornfördelningsdiagram.

En jordart kan också vara sorterad av vatten eller vind och avsatt under olika betingelser. Den innehåller då endast ett fåtal kornfraktioner. Exempel på sorterade jordarter är lera, silt, sand och grus.

Figur 25 visar en karta över områden under högsta kustlinjen, d.v.s. områden som i samband med den senaste nedisningen stått under vatten. Det är inom dessa områden som det främst finns förutsättningar att finna sorterade finkorniga sediment som lera och silt. Bebyggelse ligger i stor utsträckning i anslutning till sorterade jordarter.

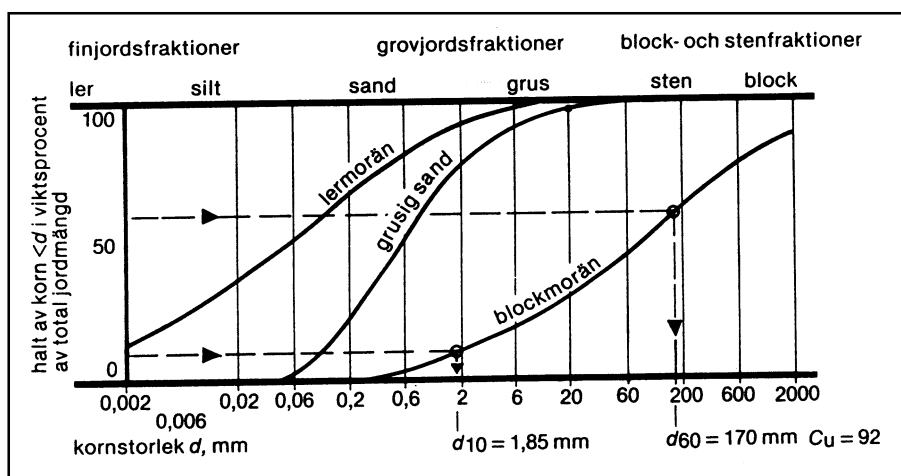
Jordartskartor av varierande kvalitet, skala och ålder finns att tillgå över större delen av Sverige. Det bästa kartmaterialet finns över delar av södra och mellersta Sverige i skala 1:50 000. Norra Sverige täcks i stor utsträckning av moderna läns- och översiktskartor i skala mellan 1:100 000 och 1:250 000.

Det svenska urberget inbegriper all berggrund äldre än ca 600 miljoner år (prekambrium). Urberget utgörs främst av magmatiska (vanligen graniter) och metamorfa bergarter (vanligen olika typer av gnejser) men även inslag av äldre sedimentär berggrund förekommer. Urberget täcker ca 75 % av Sveriges yta.

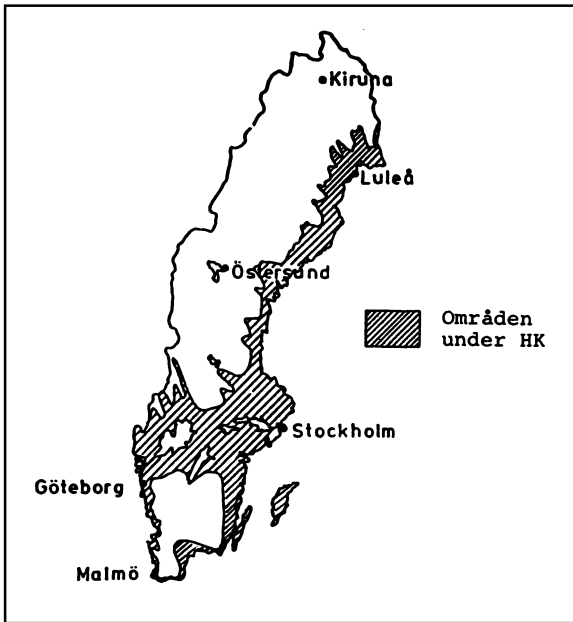
Yngre sedimentär berggrund finns i första hand i Skåne, på Öland och Gotland samt inom begränsade områden i Öster- och Västergötland, Dalarna samt Jämtland. Den sedimentära berg-

grundens består av sand- och kalkstenar samt olika typer av skiffrar.

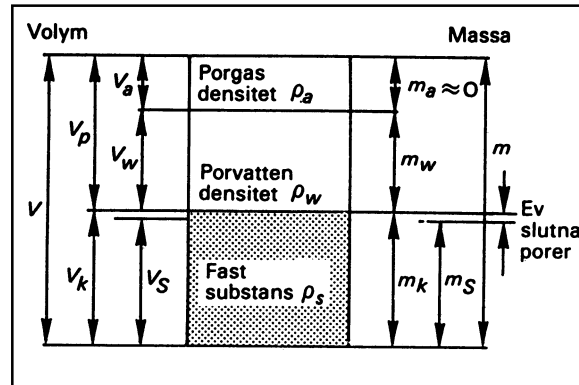
Moderna berggrundskartor i skala 1:50 000 finns över delar av norra, mellersta och södra Sverige. Länskartor i skala 1:250 000 täcker norra mellansverige samt södra och mellersta norrland.



Figur 24. Exempel på kornfördelningskurvor för morän.



Figur 25. Ungefärlig omfattning av områden under högsta kustlinjen.



Figur 26. Principskiss över jords uppbyggnad.

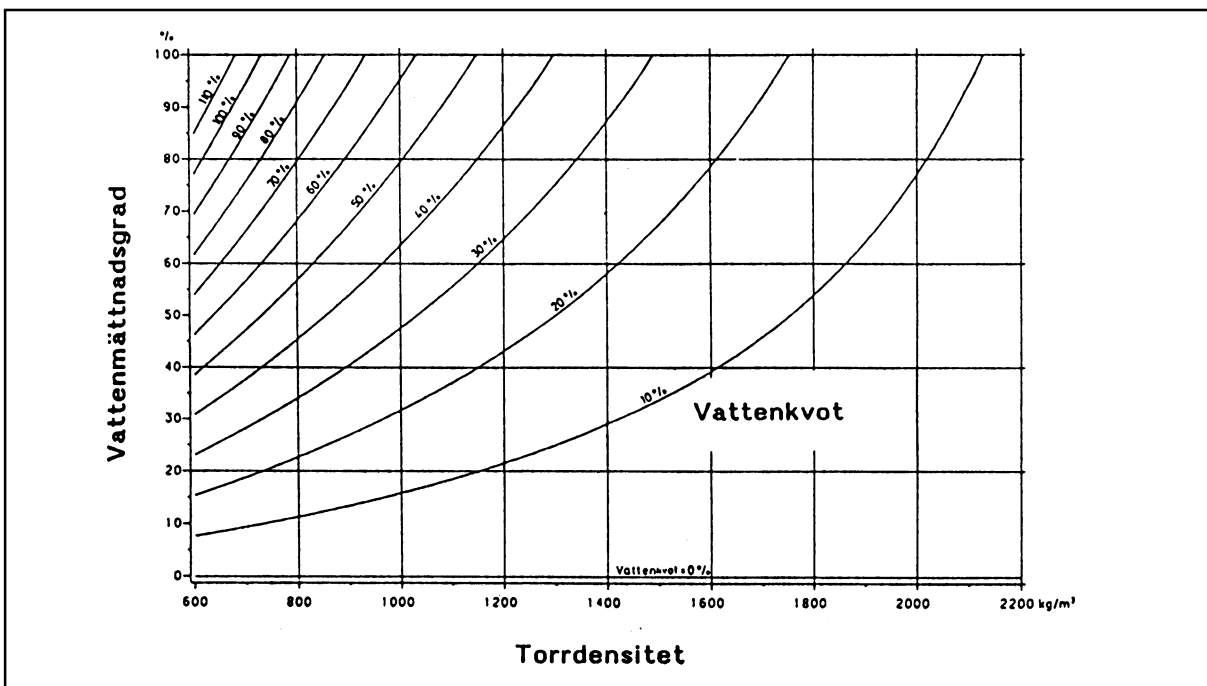
Uppbyggnad

Jords principiella uppbyggnad framgår av **Figur 26**. Jord och sedimentärt berg kan ses som ett poröst medium. Porositeten betecknas som kvoten mellan porvolymen och den totala volymen (V). Porvolymen påverkas av hur hårt packad jorden är. Ett annat mått på packningsgraden är torrdensiteten (r_d).

Porerna kan vara mer eller mindre fyllda med vatten (V_w). I **Figur 26** är ca 60–70 % av porerna fyllda med vatten. Detta betecknas med vattenmättnadsgrad.

Med kännedom om densitet och vattenkvot kan omräkningar göras mellan olika parametrar. Detta har gjorts i **Figur 27**.

Användbara samband mellan olika parametrar definieras i **Tabell 6**.



Figur 27. Samband mellan vattenmättnadsgrad, torrdensitet och vattenkvot. $r_s = 2700 \text{ kg/m}^3$.

Tabell 6. Definition av vissa jordartsbeskrivande parametrar (se även figur 26).

Kompaktdensitet	$\rho_s = m_s / V_s$	kg/m ³ (ofta ca 2700 kg/m ³)
Skrymdensitet	$\rho = m / V = \rho_d \cdot (1+w)$	kg/m ³
Torrdensitet	$\rho_d = m_s / V = \rho / (1+w)$	kg/m ³
Vattenkvot	$w = m_w / m_s = w_h / (1-w_h)$	
Vattenhalt	$w_h = m_w / m$	
Volymvattenhalt	$\theta = V_w / V = (\rho_d / \rho_w) \cdot w = n \cdot S_r$	
Porositet	$n = V_p / V = 1 - \rho_d / \rho_s$	
Vattenmättnadsgrad	$S_r = V_w / V_p = \theta / n$	

6. Litteratur

Att läsa vidare

Termiska egenskaper:

Sundberg, J. (1988). Thermal properties of soils and rocks. Chalmers tekniska högskola, Geologiska institutionen, Thesis, Publ. A57, Göteborg. (Denna rapport behandlar bl.a. metoder för bestämning av termiska egenskaper samt diagram för beräkning av termiska egenskaper. Som bilagor ingår även de två nästföljande rapporterna. Rapporten finns även tillgänglig för köp från Statens geotekniska institut och benämns då SGI Rapport nr 35, 1988.)

Sundberg, J., Thunholm, B. & Johnson, J. (1985). Värmeöverförande egenskaper i svensk berggrund. Byggforskningsrådet, rapport R97:1985, Stockholm.

Sundberg, J. (1986). Värmeöverförande egenskaper i svenska jordarter. Värmekonduktivitet, värmekapacitet och latent värme. Byggforskningsrådet, rapport R104:1986, Stockholm.

Farouki, O.T. (1986). Thermal properties of soils, Trans Tech Publication, Germany, 136 pp. (Rapporten innehåller en bra genomgång och kritisk granskning av olika metoder för bestämning av termiska egenskaper i jord).

Johansen, Ø. (1975). Varmeledningsevne av jordarter. Institutt for kjöleteknikk, 7034 Trondheim-NTH, Norge. (Rapporten innehåller bl.a. metoder för bestämning av termiska egenskaper i jord).

Hydrogeologiska översiktskartor. Serie Ah. Sveriges geologiska undersökning. (Kartorna innehåller bl a information om värmeledande egenskaper för förekommande bergarter inom kartbladet).

Markvärmeteknik:

Magnusson, C. & Sundberg, J. (1990). Markvärmeteknik.Handledning för planering och projektering. Byggforskningsrådet, T6:1990, Stockholm. (Handledningen innehåller information om markvärmeteknik för den översiktliga nivån; utredning eller förprojektering).

Geologi:

Handboken Bygg, Geoteknik, 1984. LiberFörlag, Stockholm.

Jordartskartor. Främst länskartor i serie Ca (1:250 000) och serie Ae (1:50 000) samt serie Ak (1:100 000). Sveriges geologiska undersökning, Uppsala.

Berggrundskartor. Främst länskartor serie Ah, Ba och Ca (vanligen 1:250 000), serie Ai och serie Af (1:50 000). Sveriges geologiska undersökning, Uppsala.

Datorprogram:

Persondatorprogram för beräkning av termiska egenskaper i jord och berg. Programutveckling har till viss del skett inom projektet. Beställning och information: Jan Sundberg, Terratema AB, 013-112415.

Referenser

Horai, K. (1971). Thermal conductivity of rock-forming minerals. *J. Geophys. Res.* 76, 1278-1308.

Johansen, Ø. (1975). Varmeledningsevne av jordarter. Institutt for kjöleteknikk, 7034 Trondheim-NTH, Norge.

Loberg, B. (1980). Geologi. Material, processer och Sveriges berggrund.

Sibbit, W.L., Dodson, J.G. & Tester, J.W. (1979). Thermal conductivity of crystalline rocks associated with energy extraction from hot dry rock geothermal system. *J. Geophys. Res.*, vol. 84, no B3, 1117-1124.

Sundberg, J., Thunholm, B. & Johnson, J. (1985). Värmeöverförande egenskaper i svensk berggrund. Byggeforskningsrådet, rapport R97:1985, Stockholm.

Sundberg, J. (1988). Thermal properties of soils and rocks. Chalmers tekniska högskola, Geologiska institutionen, Thesis, Publ. A57, Göteborg.

de Vries, D.A. (1952). Het warmtegeleidingsvermogen van ground. Med. Landbouwhogeschool te Wagening, 52. Wagening, Nederland.

de Vries, D.A. (1975). Heat transfer in soils. In: de Vries, D.A. & Afgan, N.H. (Eds), Heat and mass transfer in the biosphere, I. Transfer processes in plant environment, p 5-28. Washington D.C. Scripta Book.

Walsh, J.B. & Decker, E.R. (1966). Effect of pressure and saturating fluid on the thermal conductivity of compact rock. *J. Geophys. Res.*, 71, 12.



Statens geotekniska institut
Swedish Geotechnical Institute

SE-581 93 Linköping, Sweden

Tel: 013-20 18 00, Int + 46 13 201800

Fax: 013-20 19 14, Int + 46 13 201914

E-mail: sgi@swedgeo.se Internet: www.swedgeo.se