



Det här verket har digitaliserats vid Göteborgs universitetsbibliotek och är fritt att använda. Alla tryckta texter är OCR-tolkade till maskinläsbar text. Det betyder att du kan söka och kopiera texten från dokumentet. Vissa äldre dokument med dåligt tryck kan vara svåra att OCR-tolka korrekt vilket medför att den OCR-tolkade texten kan innehålla fel och därför bör man visuellt jämföra med verkets bilder för att avgöra vad som är riktigt.

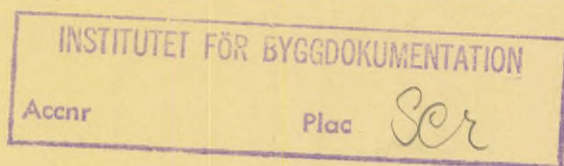
This work has been digitized at Gothenburg University Library and is free to use. All printed texts have been OCR-processed and converted to machine readable text. This means that you can search and copy text from the document. Some early printed books are hard to OCR-process correctly and the text may contain errors, so one should always visually compare it with the images to determine what is correct.



Fysikaliska effekter av ytjordvärmeuttag

Simulerade uttag för olika marker
och klimat

Per-Erik Jansson
Lars-Christer Lundin



R50:1984

Fysikaliska effekter av ytjordvärmeuttag

Simulerade uttag för olika marker och klimat

**Per-Erik Jansson
Lars-Christer Lundin**

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 820602-3 från Statens råd för byggnadsforskning till Institutionen för markvetenskap, Avdelningen för marklära, Sveriges Lantbruksuniversitet, Uppsala.

I Byggnadsforskningsrådets rapportserie redovisar forskaren sitt anslagsprojekt. Publiceringen innebär inte att rådet tagit ställning till åsikter, slutsatser och resultat.

R50:1984

ISBN 91-540-4124-4

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

Spångbergs Tryckerier AB, Stockholm 1984

Innehållsförteckning

1. Inledning	5
1.1 Bakgrund	5
1.2 Projektet	6
1.3 Rapporten	6
2. Modell för markens vatten- och värmetransport	7
2.1 Struktur	7
2.2 Randvillkor	7
2.3 Källor och sänkor i profilerna	8
2.4 Initialvillkor	8
2.5 Fysikaliska egenskaper	9
3. Utvalda simuleringar	11
3.1 Simuleringsobjekt	11
3.1.1 Jordartsegenskaper	11
3.1.2 Fryspunktsnedsättningen	13
3.1.3 Grundvattenförhållanden	14
3.1.4 Klimatologisk fördelning	15
3.1.5 Vegetationen	15
3.1.6 Värmeuttaget	17
3.2 Specifika situationer	18
3.2.1 Markens initialtillstånd	18
3.2.2 Värmekollektorns förläggingsdjup	18
3.2.3 Värmeuttagets fördelning i tiden	19
3.2.4 Snöröjning av marken	19
4. Modellerings tekniska överväganden	21
4.1 Lösning av värmeledningsekvationen	21
4.2 Skiktens mäktighet i modellen	21
5. Utdata från modellen	25
5.1 Temperatursummor	25
5.2 Vegetationssäsongen	28

6. Resultat	29
6.1 Markklimatets beroende av det årliga värmeuttaget för sex markprofiler	29
6.1.1 Temperatursummor	29
6.1.2 Vegetationssäsongen	38
6.1.3 Tjåldjup och upptining	38
6.1.4 Skattade intercept och lutningar i sambanden mellan markvariabler och årligt värmeuttag	43
6.2 Inverkan av olika initialtillstånd för markklimatet	53
6.3 Inverkan av värmekollektorns förläggingsdjup	55
6.4 Inverkan av värmeuttagets fördelning i tiden	58
6.5 Inverkan av snöröjning av marken	60
7. Praktisk användning av resultaten vid dimensionering	63
7.1 Osäkerhetsfaktorer	63
7.2 Valet av variabler för dimensionering	63
7.3 Begränsningar i materialet	64
8. Sammanfattning	65
9. Litteraturförteckning	69
Appendix	71

1. Inledning

1.1 Bakgrund

Sedan slutet av 70-talet har användningen av yttjordvärmeanläggningar blivit en vanlig förekomst i Sverige. Anläggningarna är i regel små och dimensionerade för uppvärmning av enfamiljshus. Mogensen (1983) uppskattade det totala antalet anläggningar till ca 10 000 i Sverige. Det stora flertalet av dessa kommersiellt installerade anläggningar har till dags datum fungerat väl utan störande biologiska, geotekniska eller andra fysikaliska effekter (Ahlkrona, 1983). Detta kan troligen förklaras av en förnuftig, eller i vissa fall kanske överdriven, försiktighet i dimensionering från tillverkarnas sida. Vid en teoretisk studie (Halldin *et al.*, 1979) klarades att man från en markfysikalisk utgångspunkt säkert kunde ta ut ca 3 ggr mer energi ur marken än vad som var normalt vid kommersiell dimensionering. Detta skulle dock leda till betydande förändringar i markens naturliga temperaturregim vilket givetvis då påverkar den biologiska aktiviteten. Ett uttag av värme från en lerjord i Mälardalen (Lat. N 59° 33') med 100 MJ per kvadratmeter och år* (ett normalt uttag enligt AGA-Thermias dåvarande dimensionering) skulle temperaturmässigt förflytta marken till Gävle (Lat. N 60° 40') och ett 3 ggr så stort uttag skulle ge en motsvarande förflyttning till Luleå (Lat. N 65° 40').

En experimentell ekologisk studie påbörjades 1978 vid en lokal i Mälardalen, Hacksta, där såväl markfysikaliska, markkemiska, hydrologiska, markbiologiska som hortokulturella aspekter ingick. Vid det försöket, som förmodligen är det enda i världen i sitt slag, konstaterades efter tre vegetationssäsonger (Troedsson *et al.*, 1982) att den markbiologiska aktiviteten hämmades kraftigt både av det normala värmeuttaget och, i ännu högre grad, av ett förhöjt värmeuttag (ca 2.5 ggr det normala). Några markkemiska förändringar kunde ej fastställas och de hydrologiska förändringarna, som ändrad markfuktighet, var små. En viss försening i upptorkningen på våren observerades dock. De hortokulturella effekterna visade sig främst hos vissa mindre härdiga växter och då speciellt vid det förhöjda värmeuttaget. Allmänt kan sägas att effekterna på odlingsmaterialet var störst tidigt på säsongen och att den försenade utvecklingen med största sannolikhet var kopplad till de låga marktemperaturerna.

Vid studien i Hacksta genomfördes också ett omfattande program för mätning av marktemperatur i såväl opåverkad som av olika värmeuttag påverkad mark. Sammanlagt 55 temperaturgivare på olika djup och positioner i olika ytor var inkopplade för registrering av temperaturen varje timme.

Detta material kunde användas för uttestning av den markfysikaliska modell som tidigare använts av Halldin *et al.* (1979). Vid uttestningen bekräftades att modellen kunde återge både de naturliga temperaturvariationerna och de som blev resultatet av ett värmeuttag. Som indata krävdes meteorologiska standardvariabler samt skattningar av markens fysikaliska och hydrologiska egenskaper.

* 1 kWh motsvarar 3.6 MJ eller 1 MJ motsvarar 0.28 kWh.

1.2 Projektet

För att kunna generalisera de biologiska effekterna som observerats i Hackstastudien till andra jordarter och klimat påbörjades föreliggande teoretiska studie om hur värmeuttagets påverkan beror av markens fysikaliska egenskaper. Målet med projektet har varit att kunna visa hur markens temperatur påverkas av olika värmeuttag i olika marktyper och klimat i Sverige. Projektet kan därför betraktas som en fortsättning och ett första steg till generalisering av det tidigare BFR-projektet: Ekologiska effekter av yttjordvärmeuttag (kontraksnummer 780635-4).

Det föreliggande projektet har främst genomförts som ett lagarbete av författarna till denna slutrapport. Författarna är angivna i alfabetiskt ordning utan hänvisning till eventuell huvudförfattare. Lars-Christer Lundin har dock haft huvudansvaret för datorkörningarna av modellen.

Projektet har också samordnats med ett speciellt dimensioneringsprojekt för yttjordvärme hos BFR. Målet där har varit att utarbeta generella regler eller råd för lämplig dimensionering av yttjordvärmeanläggningar. De personer som där ingått och därvid givit impulser och bidrag till detta projekt var förutom författarna:

Douglas Ahlkrona, Thermiaverken, Arvika
Sven Fredén, Statens Vägtekniska Institut, Linköping
Björn Modin, VIAK, Östersund
Palne Mogensen, konsult, Djursholm
Ingvar Rehn, Chalmers, Göteborg
Jan Sundberg, Chalmers, Göteborg
Peter Wilén, Chalmers, Göteborg

För detta projekts genomförande har också ett omfattande datortekniskt arbete utförts. Systemmännen Tomas Lohammar och Robert Olsson har konverterat och modifierat flera systemprogram för simulering och grafisk presentation från en dator PDP 11/RSX till en VAX 780/VMS.

1.3 Rapporten

Syftet med rapporten är att presentera de simulerade effekterna av olika yttjordvärmeuttag på ett sådant sätt att materialet tillsammans med biologiskt och tekniskt kunnande skall kunna utgöra en grund för dimensionering av yttjordvärmesystem i Sverige.

2. Modell för markens vatten- och värmetransport

Modellen som använts benämns SOIL. Den är en fysikaliskt baserad simuleringsmodell som från början utvecklats för att återge naturliga vatten- och värmeflöden i skogsmark (Jansson & Halldin, 1979). Den har sedan generaliserats och tillämpats i flera olika sammanhang (Jansson, 1980 och Halldin, 1980). För mark med värmeuttag användes först modellen av Halldin *et al.* (1979) och sedan också av Troedsson *et al.* (1982). En detaljerad teknisk beskrivning av modellen återfinns i Jansson & Halldin (1980). I detta sammanhang ges endast en grundläggande konceptuell beskrivning av modellen.

2.1 Struktur

Modellen utgörs främst av en numerisk lösning (Euler integrering, finita differenser) till de två kopplade partiella differentialekvationer som beskriver vatten- och värmetransport i en vertikal markprofil.

Marken uppdelas därvid i ett antal skikt för att möjliggöra en approximering av differentialekvationernas derivator med diskret beräknade differenser. Skikten väljs normalt med ökande mäktighet mot djupet (Figur 1) eftersom temperatur- och fuktighetsgradienter där snabbt minskar. Samtliga skikt (boxar) i modellen tilldelas sedan de fysikaliska egenskaper som motsvaras av den tänkta tillämpningen. Som tillståndsvariabler beräknas mängd vatten respektive energi i de olika skikten. Uppdateringen styrs av valt tidssteg som då representerar diskretiseringen av differentialekvationernas tidsderivator.

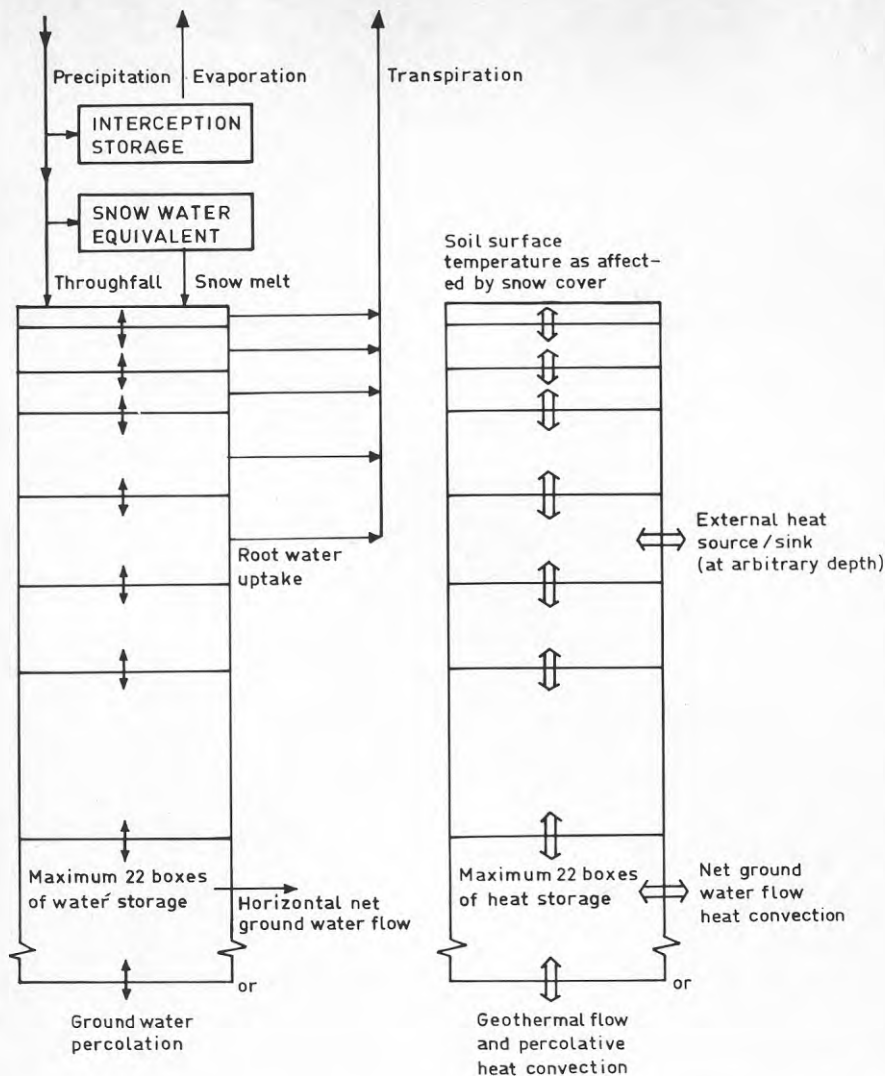
2.2 Randvillkor

För att möjliggöra lösningar till de partiella differentialekvationerna måste både övre och undre randvillkor definieras till markprofilen. Eftersom modellen skall kunna använda standardmässiga klimatdata finns rutiner för beräkning av interception av nederbörd i vegetation samt för ackumulering och smältning av snö. De faktiska randvillkoren för vattendelen utgörs av beräknad infiltration till markens översta skikt.

Motsvarande övre randvillkor för energidelen är markytans temperatur som beräknas utgående från luftens temperatur. Normalt, vid vegetationstäckt mark, kan den ansättas som lika med luftens dygnsmedeltemperatur. För bar mark beräknas en temperaturhöjning jämfört med markytan som beror av globalstrålningens storlek. Vid snötäckt mark beräknas markens ytemperatur utgående från snötäcket mäktighet och värmeledningsförmåga. Snöns värmeledningsförmåga beräknas i sin tur utifrån snöns densitet som ges i en snörutin.

Som undre randvillkor för vattendelen ansättes en konstant vattenhalt eller ett flöde till grundvattnet. Om grundvatten förekommer i den betraktade markprofilen beräknas ett horisontellt grundvattenflöde. Detta flöde kommer då att styra grundvattenytans läge som också blir modellens undre rand.

För modellens energidel ansättes normalt en konstant temperatur, svarande mot den aktuella ortens årsmedelmarktemperatur, som undre randvillkor.



Figur 1. SOIL-modellens struktur. Massbalansen till höger och energibalansen till vänster. Endast 12 av 22 möjliga skikt har utnyttjats. (Jansson & Halldin, 1980)

2.3 Källor och sänkor i profilerna

Vattenuptagningen via vegetationens rötter beräknas utgående från en relativ rotfördelning i markprofilen, potentiell avdunstning och aktuell markvattenpotential i de olika markskikten.

Som en sänktterm i modellens energidel definieras värmeuttaget från ett skikt som motsvarar förläggingsdjupet hos de tänkta värmeuttagsrören.

Tabell 1. Nödvändiga egenskaper till modellens olika delar

Process	Nödvändig information
Nederbördsinterception	Lagringskapacitet i vegetationen; Kvot mellan avdunstningshastighet från våt respektive torr vegetation
Snö	Smältning/frysning som funktion av lufttemperaturen, globalstrålningen och snöns ålder; Snöns densitet som funktion av vatteninnehåll, total mängd och ålder hos snötäcket; Termisk konduktivitet som funktion av snöns densitet; Retentionskapacitet av vatten i snön
Avdunstning/Transpiration och vattenupptagning via rötter	Total ytresistans vid potentiell transpiration; Reduktion av potentiell transpiration som funktion av marktemperatur och vattenpotential; Relativ rotfördelning i markprofilen
Markvattenflöde och vattenmängder	Mättad konduktivitet Omättad konduktivitet som funktion av vattenhalt Vattenpotential som funktion av vattenhalt
Grundvatten	Nettoflöde som funktion av grundvattendjup
Markvärme och energiinnehåll	Termisk konduktivitet som funktion av torr skrymdensitet, samt halt av vatten och/eller is; Värmekapacitet som funktion av mängd fast material, vatten och/eller is; Frysponentsnedsättning som funktion av porstorleksfördelningsindex

2.4 Initialvillkor

Vid varje simulerings början måste initialvillkor ansättas till marken. Dessa kan väljas som vattenhalter eller vattenpotentialer samt grundvattendjup för vattendelen medan energidelen behöver temperatur eller energiinnehåll samt eventuellt tjäldjup.

2.5 Fysikaliska egenskaper

Fysikaliska egenskaper ansätts i form av parametrar till modellens olika delar. Flertalet av dessa parametrar kan erhållas genom oberoende fysikaliska mätningar men vissa är mer empiriskt skattade genom känslighetsanalyser med modellen (se Jansson & Halldin, 1980). I Tabell 1 återges den viktigaste informationen som behövs för att specificera egenskaperna till de olika processerna i modellen.

3. Utvalda simuleringar

3.1 Simuleringsobjekt

Ytjordvärmeanläggningar projekteras och anläggs över hela landet på en rad olika marktyper med olika grundvattenförhållanden och olika typer av markanvändningar. Uttagssituationen varierar således starkt mellan olika anläggningar. För att kunna hantera alla dessa situationer har vissa typiska simuleringsobjekt valts ut. Dessa objekt karaktäriseras standardmässigt av specifika egenskaper:

- 1) Jordartsförhållanden
- 2) Grundvattenförhållanden
- 3) Klimat
- 4) Vegetation och markanvändning
- 5) Värmeuttag

Av dessa egenskaper är endast klimatet baserat på faktiska indata i simuleringarna. Jordartsegenskaper och grundvattenförhållande ansätts med hjälp av typjordar utgående från erfarenheter om modellens känslighet och den variationsbredd som finns i markens hydrologiska och termiska egenskaper.

3.1.1 Jordartsegenskaper

Markens egenskaper bestäms till största delen av dess jordartssammansättning. De markprofiler som konstruerats består av ett övre, 35 cm tjockt, skikt av matjord och ett undre lager av ursprunglig alvjord. Mellan matjorden och alvjorden finns ett 30 cm tjockt övergångsskikt med intermediära egenskaper. På detta sätt har tre olika profiler med mineraljordarter tagits fram genom att utnyttja pF-kurvor rapporterade av Andersson och Wiklert (1972). Markprofilerna representerar sand-, silt- och lerjordar. Mekanisk sammansättning och fysikaliska data för dessa mineraljordarter framgår av Tabell 2.

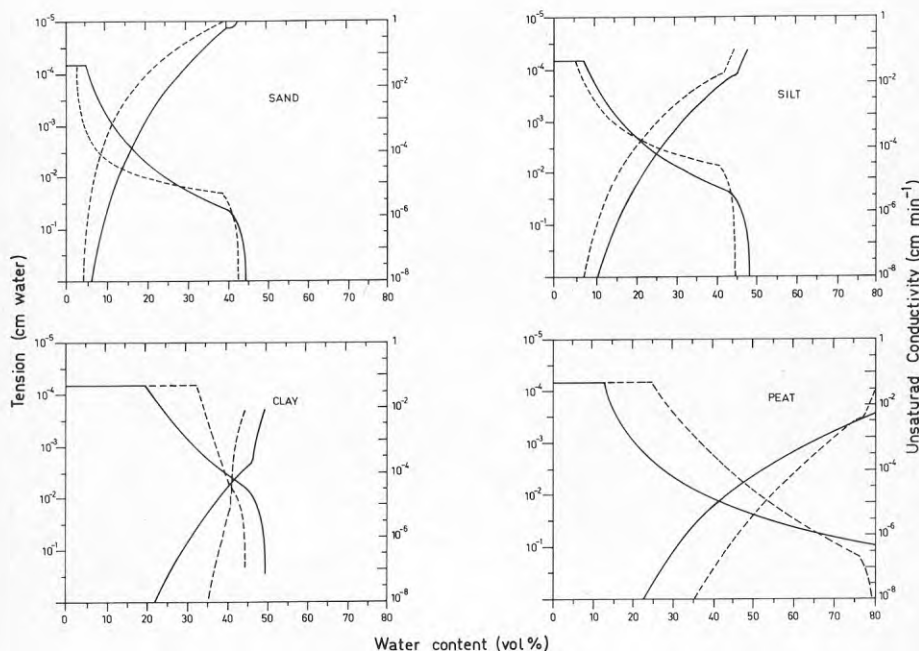
Dessutom har en markprofil helt bestående av torv utvalts. Denna grundar sig på data från Puustjarvi and Robertson (1975). Här utgörs övre skiktet av låghumifierad torv och undre skiktet av höghumifierad torv.

Det gjorda urvalet av markprofiler överensstämmer väl med den aktuella fördelningen av projekterade ytjordvärmeanläggningar. Enligt D. Ahlkrona (muntligen) ligger 40% av Thermia-verkens anläggningar på lerjordar, 18% på mo och mjåla samt 11% på sand. En relativt stor andel ligger på moränjordar, men dessa har ej behandlats. Moränjordarna kan dock delvis representeras av siltprofilen eftersom dess termiska egenskaper liknar siltjordar. Endast ett fåtal anläggningar ligger på torvmark, men torven har trots detta tagits med på grund av sin stora potential och speciella karaktär.

Den omättade konduktiviteten är beräknad utgående från pF-kurvorna, med ett analytiskt uttryck efter Mualem (1976). Här saknas tyvärr empiriskt material om svenska jordarter, men de ansatta värdena torde representera rimliga skattningar för typjordar. Samtliga i modellen använda hydrologiska jordartsegenskaper, dvs både pF-kurvan och omättade konduktiviteten, återges i Figur 2. Torven skiljer sig från mineraljordarna främst genom den höga porositeten och den goda vattenhållande förmågan. Mineraljordarna visar en gradvis övergång med ökande vattenhållande förmåga ju högre lerhalten är. Den vattenhållande förmågan är

Tabell 2. Mekanisk sammansättning och vissa fysikaliska data för tre mineraljordsprofiler. Den mättade konduktiviteten var för sand 1 cmmin^{-1} , för silt 0.03 cmmin^{-1} och för lera 0.002 cmmin^{-1} .

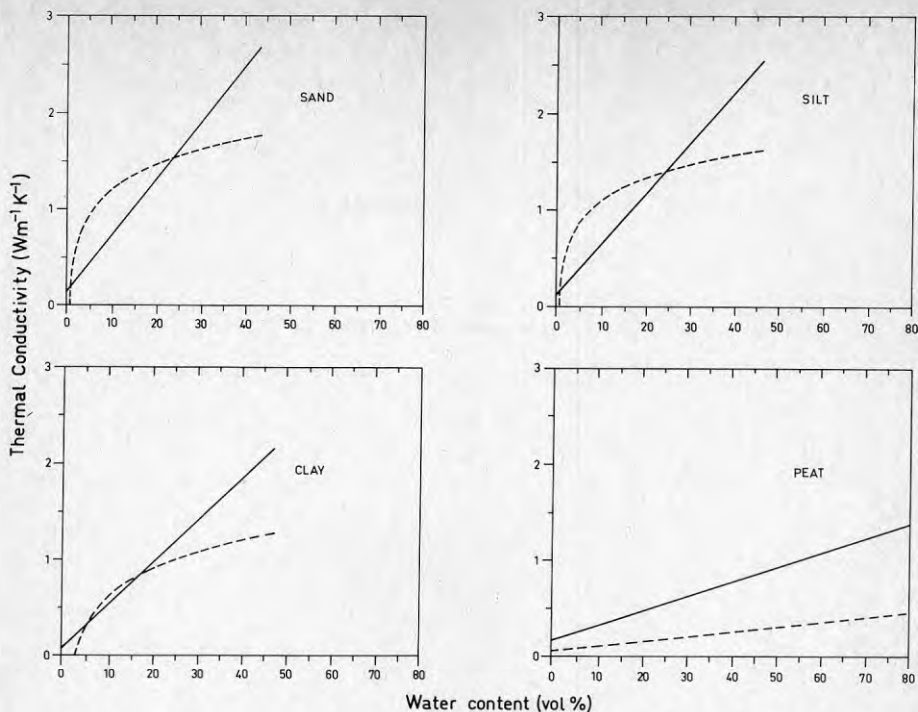
Jord- art	Skikt	Ler <.002 mm (vikts%)	Silt .002-.06 mm (vikts%)	Sand .06-2 mm (vikts%)	Organiskt material (vikts%)	Porositet (vol%)	Vissnings- gräns (vol%)
Sand	Matjord	1	14	81	4	44.5	4.0
	Gränsskikt	0	12	85	3	43.6	3.2
	Alvjord	0	10	89	1	42.8	2.5
Silt	Matjord	5	16	74	5	48.2	6.6
	Gränsskikt	6	34	57	3	46.5	5.6
	Alvjord	7	51	40	2	44.9	4.5
Lera	Matjord	32	44	18	6	49.5	14.9
	Gränsskikt	40	42	14	4	47.0	20.6
	Alvjord	48	40	9	3	44.6	26.2



Figur 2. Omättad konduktivitet och vattenpotential (tension) som funktion av vattenhalt för de studerade typjordarterna sand, silt, lera och torv. Den heldragna linjen hänför sig till matjordsskiktet (0–35 cm:s djup) medan den streckade hänför sig till alvjordsskiktet (>65 cm:s djup).

betydelsefull då både värmeledningsförmågan och värmekapaciteten i marken beror starkt av vattenhalten.

För mineraljordarna råder ett linjärt förhållande mellan värmeledningsförmåga och vattenhalt i frusen mark, medan förhållandet är olinjärt i ofrusen mark (Figur 3). Ekvationerna för värmeledningsförmågan i mineraljordarna härrör från



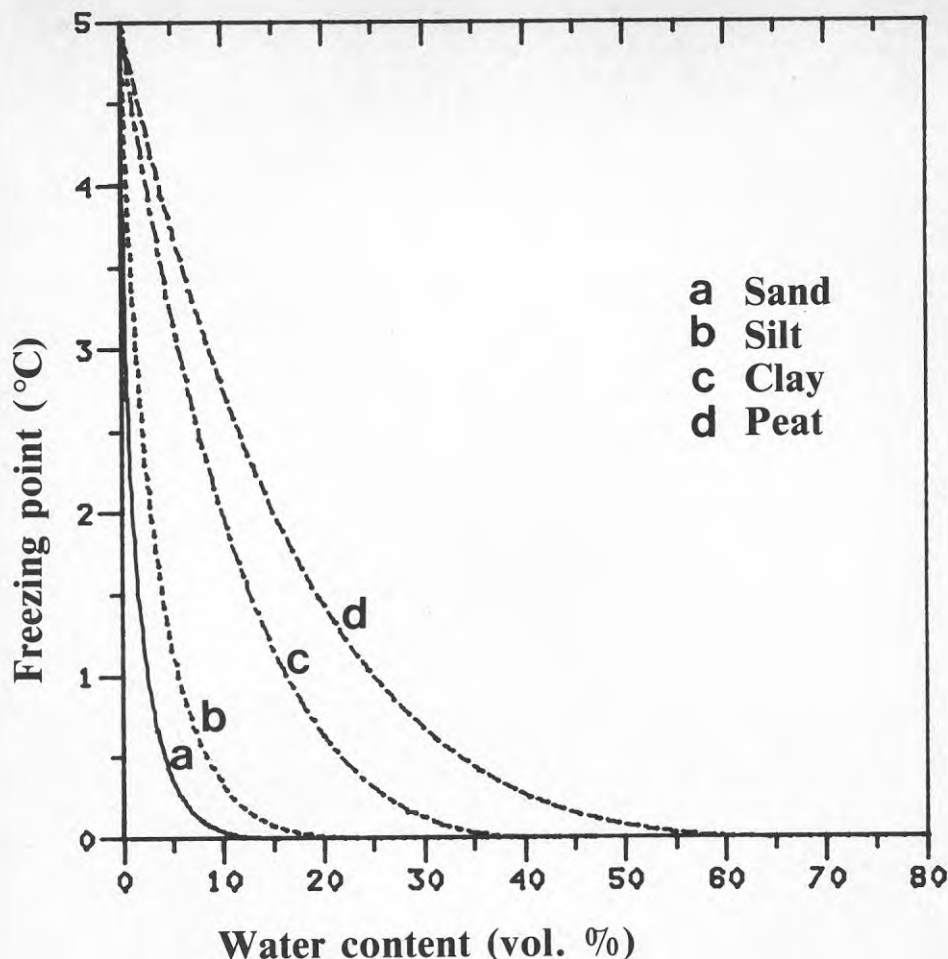
Figur 3. Värmeledningsförmågan som funktion av vattenhalt för de studerade typjordarterna sand, silt, lera och torv. Den heldragna linjen hänför sig till frusen jord medan den streckade hänför sig till ofrusen jord.

Kerstens (1949) undersökningar. Små tillskott av vatten resulterar i en avsevärd höjning av värmeledningsförmågan vid låga vattenhalter genom att den termiska kontakten mellan mineralpartiklarna förbättras, medan ytterligare tillskott av vatten inte ger samma markanta utslag. För den frusna marken, jämfört med den ofrusna, ger isen, med sin höga värmeledningsförmåga, en ökad värmeledningsförmåga i marken vid vattenhalter över 20%.

För samtliga mineraljordar antas här en normal mineralsammansättning med höga halter av kvarts för de grovkorniga jordarterna och en snabbt avtagande kvartshalt för silt och lera. Kvartshaltens inverkan har ej direkt beaktats, trots att den spelar en avgörande roll för värmeledningsförmågan (Johansson, 1980), då den som regel inte är känd vid projekteringen av ytjordvärmeanläggningen.

Torvmarken, med sitt organiska material, har en avsevärt lägre värmeledningsförmåga (de Vries, 1975). Här spelar vattenhalten heller inte samma avgörande roll, dock ökar värmeledningsförmågan vid tjälning. Tjälningens inverkan är dock osäker och här ansatta värden grundar sig endast på skillnaden i värmeledningsförmåga hos is respektive vatten.

Jordarnas värmekapacitet beräknas utifrån volymsandelarna fast material, vatten och is. Här spelar mineralsammansättningen en mindre viktig roll.



Figur 4. Fryspunkten som en funktion av halt ofruset vatten för typjordarna sand, silt, lera och torv. Fryspunkten minimerades till -5°C .

3.1.2 Fryspunktsnedsättningen

I den omättade zonen i marken är vattnet bundet och därigenom utsatt för en fryspunktsnedsättning. En viss andel av vattnet är således inte fruset vid en marktemperatur av 0°C utan kan röra sig under inverkan av en potentialgradient. Härigenom erhålles en transport av vatten mot tjälfronten. Halten ofruset vatten beror av temperaturen och når för de flesta jordarter ett försumbart värde vid -5°C . Modellen sätter detta värde till 0%. I Figur 4 visas detta beroende för sand, silt, lera och torv. Kurvorna är beräknade utgående från pF-kurvorna och ansluter i stort till experimentella data från bland andra Beskow (1932).

3.1.3 Grundvattenförhållanden

Två typer av grundvattenförhållanden har simulerats för sand- och siltjorden: dels ett högt grundvattenstånd och dels ett lågt grundvattenstånd. För båda fallen har en initialgrundvattenyta definierats på 1.5 respektive 6.0 m:s djup, varefter grund-

Tabell 3. Utvalda typår med urvalsvariablerna maximalt tjäldjup, vegetationssäsongens längd och köldmängd för de olika stationerna.

Station	Status	År	Maximalt tjäldjup (m)	Vegetationssäsongens längd (dagar)	Köldmängd lufttemp (graddagar)
Kristianstad	Kallt år	62/63	-0.6	224	- 534
	Medianår	64/65	-0.3	210	- 209
	Varmt år	72/73	-0.3	242	- 47
Uppsala	Kallt år	65/66	-0.6	170	-1075
	Medianår	64/65	-0.6	192	- 448
	Varmt år	72/73	-0.3	167	- 107
Luleå	Kallt år	65/66	-1.6	114	-2279
	Medianår	75/76	-1.2	132	-1306
	Varmt år	72/73	-0.8	137	- 699

vattenytan fått variera beroende på vattentillgång. Vattenhaltsfördelningen ovan grundvattenytan ansattes initialt i jämvikt med grundvattnet, vilket innebär att profilens markvattenmagasin motsvaras av fältkapacitet. Om den modellerade grundvattenytan stigit över den initiala har det horisontella grundvattenflödet ökat och efter en flödestopp återgått till initialvärdet. Grundvattenflödet vid grundvattenstånd under det initiala styrs huvudsakligen av ett ansatt basflöde.

Simuleringarna med torvprofil har endast gjorts med det höga grundvattenståndet. Känslighetsanalys visade att grundvattenytans nivå spelade en underordnad roll för lerjorden, varför endast den djupa grundvattennivån där utnyttjades.

3.1.4 Klimatologisk fördelning

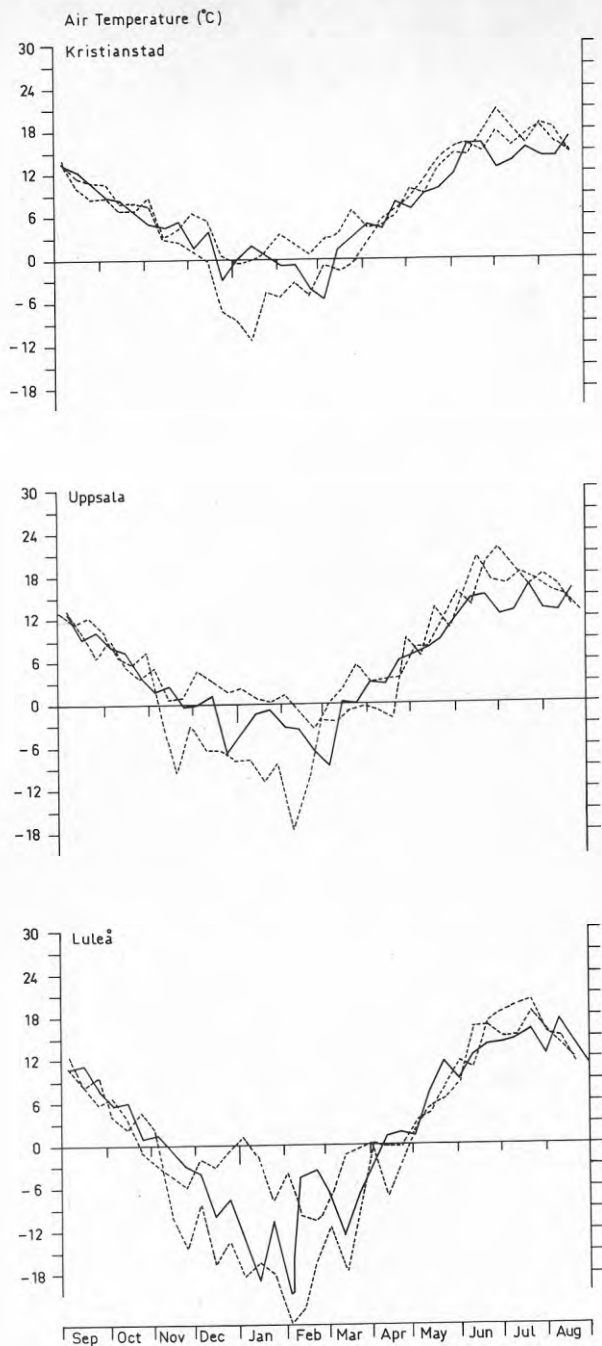
Tre orter har valts ut för att klimatologiskt representera Sverige. Orterna är Kristianstad som representerar södra Sverige, Uppsala som representerar mellersta Sverige och Luleå som representerar norra Sverige. Från dessa orter har tjuogoårs-serier (1961-1980) av SMHI:s klimatdata utnyttjats. Dygnsvärden av potentiell transpiration, nederbörd och temperatur har använts som drivdata till modellen.

Ur tjuogoårsserierna har för varje ort tre år (1 september till 1 november påföljande år) utvalts att representera ett kallt, ett varmt samt ett medianår. Vägledande variabler, rangordnade i nämnd ordning, vid detta urval har varit maximalt tjäldjup, vegetationssäsongens längd samt köldmängd (summan av alla $T < 0^{\circ}\text{C}$). På så sätt har huvudvikten lagts vid vinterklimatet. Samtliga urvalsvariabler har beräknats av modellen. Tabell 3 återger de styrande variablerna för de valda åren.

Figur 5 återger tiodagarsmedel av lufttemperatur för de utvalda åren. Det framgår tydligt att vinterklimatet styrts urvalet; detta är också den mest avgörande skillnaden mellan stationerna. Notera att vegetationssäsongen, som varit en variabel underordnad både maximalt tjäldjup och köldmängd, inte alltid är kortast under det kalla året.

3.1.5 Vegetationen

Samtliga simuleringar är gjorda med en vegetation bestående av gräs. Dels är detta den vanligaste vegetationstypen där ytjordvärmeanläggningar projekteras och dels är valet av vegetation styrts av de drivdata som används. Den potentiella transpi-



Figur 5. Lufttemperaturen i Kristianstad, Uppsala och Luleå för de olika typåren. Heldragen linje avser 10-dygnsmedelvärde för medianåret medan streckade linjer avser 10-dygnsmedelvärde för det kalla respektive det varma året. (Se Tabell 3).

Tabell 4. Skiktens mäktighet i modellen med rotfördelning för torvjords- och mineraljordsprofilerna.

Skikt (cm)	Rotfördelning (%)	
	Torv	Mineraljord
0— 16	70	35
16— 44	30	30
44— 72	0	20
72— 100	0	10
100— 140	0	5
140— 200	0	0
200— 280	0	0
280— 360	0	0
360— 520	0	0
520— 680	0	0
680— 840	0	0
840— 1000	0	0

rationen vid de olika stationerna hänför sig till gräsvegetation; i modellen uppskattas endast kortvågsalbedot för vegetationen.

Det vatten som åtgår till transpiration hämtas ur olika markskikt beroende på hur rotfördelningen definieras i modellen. Olika rotfördelningar har använts för torven respektive övriga markprofiler (Tabell 4).

Vid barmark kommer uppvärmningen, speciellt under våren, att vara något effektivare på grund av ökad exponering av markytan. För ymnigare vegetation, t ex skuggande träd och buskar med kraftig undervegetation kommer effekten att bli den motsatta.

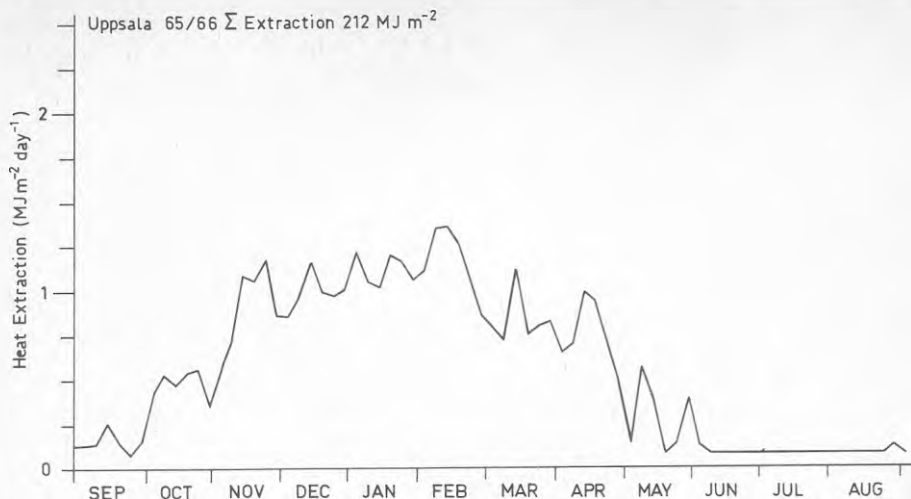
3.1.6 Värmeuttaget

Beroende på värmebehov, tillgänglig yta för anläggningen, markanvändning och ekonomiska överväganden projekteras ytjordvärmeanläggningar för ett visst värmeuttag. De energiuttag som valts för de olika simuleringsobjekten ligger i intervallet 25—500 MJm⁻²år⁻¹ (7—140 kWhm⁻²år⁻¹)*. Ett normalt uttag för en enfamiljsfastighet i mellansverige är ca 100 MJm⁻²år⁻¹ (28 kWhm⁻²år⁻¹); då krävs en tillgänglig yta av storleksordningen 500 m² för värmekollektorerna. Normalt fördelar sig energiuttaget på dels ett konstant uttag för varmvattenproduktion och dels ett uttag för uppvärmning som beror av utomhustemperaturen (Figur 6).

Termerna värmeuttag och energiuttag syftar i denna rapport på det årliga värmeuttaget och används som synonymer. Enheten för denna storhet kommer i enlighet med SI-systemet att vara MJm⁻²år⁻¹. Effektuttagets inverkan, dvs inverkan av det värmeuttag som momentant behövs för att klara en viss belastning, behandlas inte i denna studie.

Värmepumpens verkningsgrad begränsar anläggningens effektivitet så att uttaget når ett maximalt värde vid en viss utomhustemperatur. Om marktemperaturen sjunker alltför mycket kommer också anläggningens effektivitet att minska och vid en tillräcklig nerkylning av marken kommer effekten att bli noll. I modellen reduceras uttagets storlek vid en temperatur på uttagsdjupet av -5 °C för att nå nollnivån om marktemperaturen sjunker till -10 °C.

*1 kWhm⁻²år⁻¹ motsvarar 3.6 MJm⁻²år⁻¹



Figur 6. Värmeuttagets fördelning under året i Uppsala som det simulerades det kalla året 1965/66. Det totala värmeuttaget under året var 212 MJm⁻².

3.2 Specifika situationer

Ett antal specifika uttagsituationer har dessutom valts ut för att spegla hur dessa påverkar markklimatet. Dessa simuleringsobjekt är i princip variationer på det tema som skisserats ovan och resultaten redovisas som avvikelser från de primära simuleringsobjekten. Inverkan av en variation av följande uttagsituationer har studerats:

- 1) Markens initialtillstånd
- 2) Värmekollektorns förlägningsdjup
- 3) Värmeuttagets fördelning i tiden
- 4) Snöröjning av marken

3.2.1 Markens initialtillstånd

För att få tillförlitliga initialdata till modellkörningarna körs modellen normalt en vintersäsong innan själva utvärderingen av resultaten sker. När modellen startas krävs att användaren specificerar en marktemperatur för varje skikt. Då sådana observationer oftast inte är tillgängliga ansätts denna marktemperatur grovt i alla standardmässiga körningar med hänsyn tagen till ortens medeltemperatur och det aktuella värmeuttagets storlek. Beroende på hur noggrant dessa marktemperaturer uppskattas tar det olika lång tid innan modellen ger rättvisande resultat.

För att undersöka känsligheten för initialtillståndet gjordes ett antal speciella simuleringar där marktemperaturen initialt fick motsvara situationen för opåverkad mark samt för mark som utnyttjas för ytjordvärmeändamål med ett värmeuttag av dels ca 100 MJm⁻²år⁻¹ (normalt uttag) och dels ca 300 MJm⁻²år⁻¹ (intensivt uttag). Övergången från dessa situationer till dels ett normalt uttag och dels

ett intensivt uttag studerades därefter. Simuleringarna gjordes med meteorologiska data från Uppsala för en sandjord med ytligt grundvatten och en lerjord.

3.2.2 Värmekollektorns förläggningsdjup

De primära simuleringarna hänför sig standardmässigt till ett värmekollektordjup av 80 cm. Detta är ett i praktiken vanligt förläggningsdjup. I vissa situationer kan dock andra förläggningsdjup förekomma. Ett ytligare förläggningsdjup kan vara fördelaktigare då det medför lägre anläggningskostnader, men det ger i gengäld större påverkan på de ytliga markskikten. En djupare förläggning å andra sidan ger större påverkan på förhållande i de djupare marklagren; djupare tjäle och därmed senare upptining av marken. Dylika övervägande kan för en viss markanvändning vara avgörande dimensioneringsaspekter. Tunna marktäckan eller extremt svårbearbetade marker leder ofta till ett val av ett ytligt förläggningsdjup.

Två alternativa förläggningsdjup (60 respektive 120 cm) har simulerats. Klimatdata från Uppsala utnyttjades och studien omfattade en sandjord med ytligt grundvattenstånd, en lerjord och en torvjord. Resultaten från simuleringarna med alternativa förläggningsdjup representerar förhållanden under ett klimatologiskt normalt år, men med flera olika värmeuttag. En jämförelse med de standardmässiga simuleringarna, där uttaget förlagts till 80 cm, gjordes.

3.2.3 Värmeuttagets fördelning i tiden

Vid utnyttjande av ytjordvärme för uppvärmning av villor eller flerfamiljshus sker värmeuttaget normalt som dels ett basuttag för varmvattenbehovet och dels ett uttag för uppvärmning, vars storlek kommer att bero av utomhustemperaturen. Värmeuttaget kommer således att fördela sig i tiden i enlighet med Figur 6. Energiförbehovet kan dock vara fördelat på andra sätt under året. Som exempel kan nämnas varmvattenbehovet i badhus och sporthallar, där stora mängder varmvatten behövs under hela året.

För att få en uppfattning om vad som sker när värmeuttagets fördelning i tiden förändras har simuleringar med ett konstant värmeuttag, i princip enbart basuttaget, gjorts. Dessa speciella simuleringar har gjorts för en sandjord med ytlig grundvattennivå och en lerjord med klimatdata från Kristianstad och Luleå under ett år. En jämförelse med de standardmässiga simuleringarna gjordes för motsvarande årssummor av uttagna energimängder.

3.2.4 Snöröjning av marken

Vid vissa typer av markanvändning snöröjs marken vintertid. Detta gäller exempelvis parkeringsplatser, torg, vägar och gångstigar. I andra fall, parker, trädgårdar o.d. kompakteras snön så att dess goda isolerande effekt mot avkylning av marken går förlorad. Ingrepp av detta slag leder till att den låga lufttemperaturen under vintern får större genomslagskraft på marktemperaturen. Detta i sin tur ger upphov till ett ökat tjäldjup och en försenad upptining av marken.

Genom att höja snöns termiska konduktivitet i modellen med en tiopotens kunde simuleringar som representerar en mark med starkt kompakterad snö göras. Ackumulations- och smältförloppet bibehölls dock på samma sätt som om snön varit naturligt lagrad. Eftersom snön på detta sätt fräntas sin goda värmeisolerande förmåga under vintern, men samtidigt har kvar sin fördröjande effekt vid uppvärmningen under våren representerar denna situation något av en ytterlighet. På orterna Uppsala och Luleå har två olika markprofiler, sandjord med en ytlig grund-

vattennivå och lerjord, valts ut som simuleringsobjekt. Uppsalasimuleringen representerar en relativt varm vinter med ett snödjup av 0.1 m och en köldmängd av ca —440 graddagar, medan simuleringen i Luleå representerar en sträng vinter med 0.9 m snö och en köldmängd av ca —2280 graddagar. Simuleringarna jämfördes med motsvarande simuleringar gjorda med naturligt lagrad snö.

4. Modellerings tekniska överväganden

Innan de slutliga simuleringarna gjordes utfördes testkörningar för att fastställa vilken modellupplösning som krävs för att ge önskad noggrannhet. I detta initialskede användes drivdata från Uppsala och en reell markprofil bestående av grovmo, mellansand och grovsand (se Jansson & Halldin, 1979).

De viktigaste övervägandena rör hur mäktiga skikten i modellen kan göras och hur omfattande lösningen av värmeledningsekvationen måste vara. Vidare måste ett tidssteg för integration väljas så att tillräcklig noggrannhet erhålles och så att instabiliteter i modellen undviks. De två förstnämnda problemen kommer att diskuteras i det följande.

4.1 Lösningen av värmeledningsekvationen

För att studera värmelagring och värmetransport i marken utnyttjas värmeledningsekvationen. Modellen medger två olika metoder för lösning av denna. Det första, enklare, angreppssättet är att hålla markvattenhalten konstant i tiden. En markvattenhalt för varje skikt i modellen ges då som indata. Det andra angreppssättet ger en mera fullständig lösning av värmeledningsekvationen. Här tillåts markvattenhalten variera i såväl tid som rum beroende på infiltration, evapotranspiration och fuktvandring i profilen.

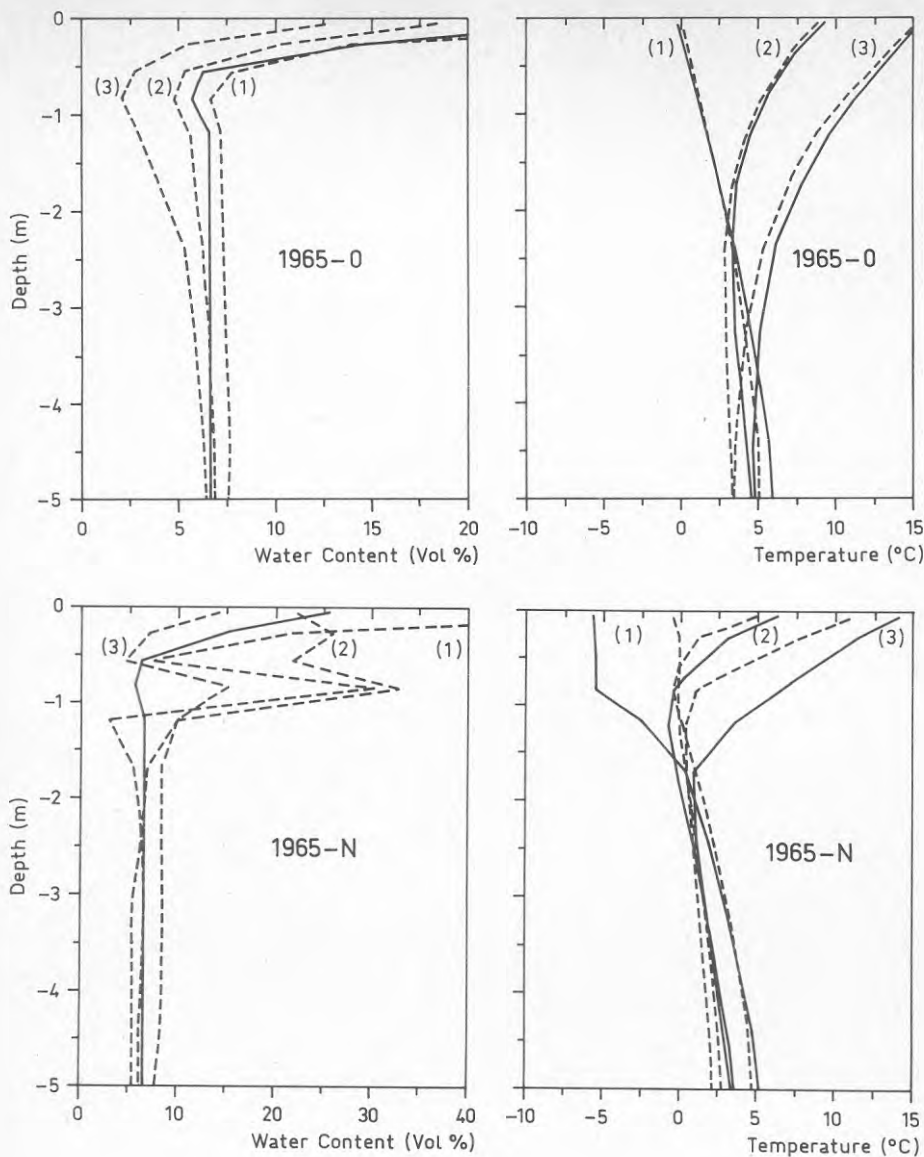
Den förra metoden, som inte medger interaktion mellan vatten- och värmetransport, är den enklaste av de bägge och kräver således mindre datorresurser. För att utvärdera om detta enklare angreppssätt skulle ge godtagbar noggrannhet gjordes testkörningar på drivdata från Uppsala (Jansson & Lundin, 1983). Dessa simuleringar visade att underskattningar av marktemperaturen på upp till 5 °C under en kall vinter kunde bli resultatet av den enklare ansatsen. Under sommaren erhöles överskattningar av samma storleksordning. Effekten var mest märkbar när värmeuttag gjordes (Figur 7). Motsvarande simulering av en varmare vinter med mindre värmeuttag gav god överensstämmelse mellan de båda ansatserna; dock sämre för sommarperioden.

Det är tydligt att det råder en i vissa fall stor skillnad mellan resultaten från de båda ansatserna. Då lösningen av värmeledningsekvationen där vatten- och värmeinteraktion inte medges kan ge upphov till både över- och underskattningar har den mera fullständiga lösningen använts i de presenterade resultaten.

4.2 Skiktens mäktighet i modellen

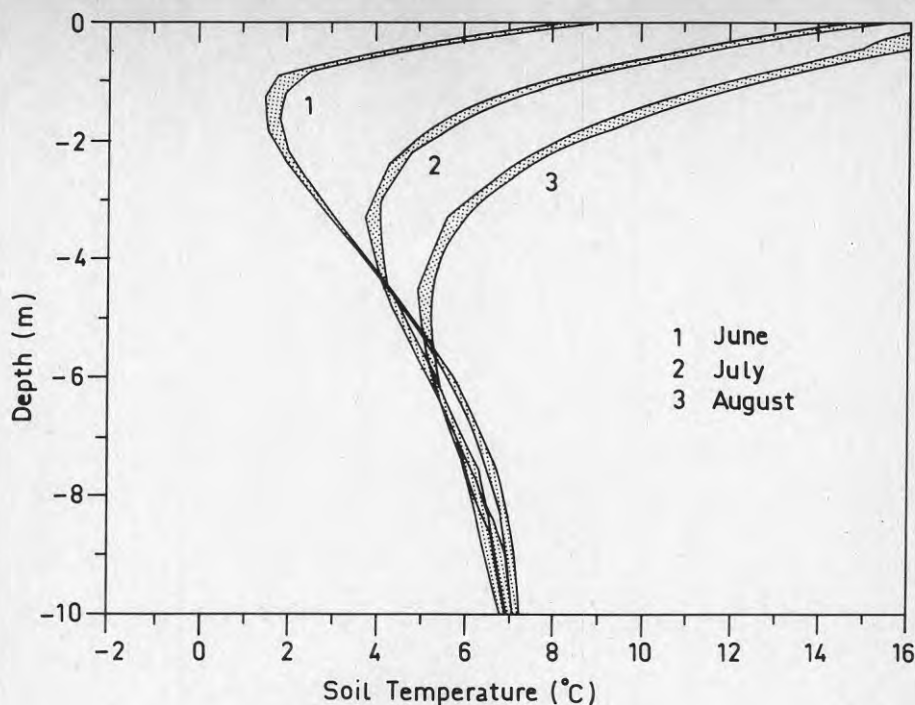
I modellen beskrivs jordprofilen av ett antal skikt med en viss tjocklek och med vissa tillståndsvariabler. Vid valet av antal skikt måste dels jordprofilens komplexitet och dels vatten- och värmeflödernas storlek beaktas; en flerskiktad jordprofil kräver ett stort antal skikt i modellen och en mark där kraftiga temperatur- eller fuktighetsgradienter förväntas kräver tunna skikt för att flödena ska kunna beräknas med noggrannhet. Diskretiseringen måste således anpassas till det objekt som simuleras.

Vissa utdata är speciellt känsliga för jordprofilens diskretisering. Skikten är homogena och har vid en given tidpunkt vissa värden på sina tillståndsvariabler, vilket exempelvis innebär att en isblandning vid tjälbildning är jämt fördelad i



Figur 7. Simulerade medelvärden av markvattenhalt och marktemperatur i en grov sand i Uppsala för februari (1), maj (2) och juni (3) under 1965. Övre delen av figuren avser naturliga förhållande, 1965-0, medan undre delen avser ett normalt värmeuttag (ca $100 \text{ MJm}^{-2}\text{år}^{-1}$), 1965-N. Heldragen linje markerar att simuleringen gjorts med konstant vattenhalt. I markvattenhalten inkluderas även fruset vatten. (Jansson & Lundin, 1983)

hela skiktet. Detta gör att tjälldjupet blir svårt att definiera eftersom någon enkel tjälfront eller 0°C -isoterm ej definieras i modellen. De av modellen beräknade tjälldjupen har följaktligen ej bättre upplösning än vad som motsvaras av modell-diskretiseringen.



Figur 8. Simulerade medelvärden av marktemperaturen i en grov sand för juni (1), juli (2) och augusti (3) 1972 i Uppsala vid ett normalt värmeuttag (ca $100 \text{ MJm}^{-2}\text{år}^{-1}$). De skuggade fälten anger det intervall inom vilket marktemperaturen förändrades då skiktjockleken i modellen varierades med en faktor två.

Testkörningar med dels den skiktuppsättning som redovisas i Tabell 4 och dels två uppsättningar med tunnare skikt gjordes. De bägge finare diskretiseringarna hade en skiktjocklek av 50 respektive 75 % av den illustrerade. Resultatet från en körning av ett varmt år med ett värmeuttag av ca $100 \text{ MJm}^{-2}\text{år}^{-1}$ (ca $28 \text{ kWhm}^{-2}\text{år}^{-1}$) visar att diskrepansen mellan grövsta och finaste skiktindelning är i stort sett försumbar (Figur 8). Övriga gjorda simuleringar gav liknande eller mindre diskrepanser. Notera också att större delen av årsvariationen är borta på 10 m:s djup. Härmed befanns den grövsta skiktindelningen vara tillfullo för att ge tillräcklig noggrannhet i de redovisade resultaten.

5. Utdata från modellen

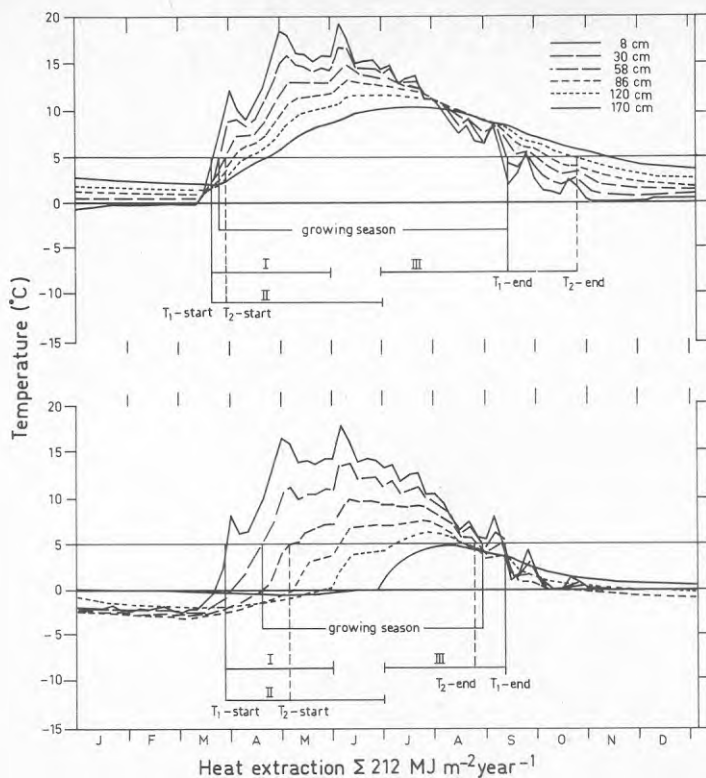
Modellen ger standardmässigt alla tillståndsvariabler som energiinnehåll och vattenmängd samt motsvarande flöden som utdata med en av användaren specificerad tidsupplösning. Dessutom erhålles ett antal hjälpvariabler som marktemperatur, termisk kvalitet (kvoten mellan mängd fruset och totalmängd vatten), markvattenhalt, vattenpotential, avdunstning, grundvattenyta, grundvattenflöde, snömängd och snödjup. Fysikaliskt ger denna uppsättning av utdata en helhetsbild av det simulerade förloppet. Biologiskt är det dock svårt att utifrån dessa variabler kvantifiera betydelsen av ett förändrat markklimat. I ett försök att ge simuleringarna ökad biologisk tolkningsbarhet har därför ytterligare ett antal integrerade utvariabler beräknats som utdata. Som viktiga mått på odlingsbetingelserna har olika marktemperatursummor samt början och slut på vegetations-säsongen definierats. Dessa mått har valts utgående från tidigare försök att kvantifiera klimatets inverkan på odlingsbetingelser (Odin *et al.*, 1983). Dessutom har maximalt tjäldjup samt datum för tjälfri mark analyserats. Maximalt tjäldjup anges som medeldjupet för det djupast belägna skiktet där tjälning påbörjats. Samtliga dessa mått på odlingsbetingelserna har relaterats till årssumman av aktuellt värmeuttag beräknat från den 1 november till den 31 oktober nästkommande år.

5.1 Temperatursummor

Odin *et al.* (1983) beräknade lufttemperatursummor som summan av de dygnsmedeltemperaturer som överskrider $+5^{\circ}\text{C}$, dels för hela året (Figur 9, sid. 33) och dels för två delperioder; från vegetations-säsongens början till den 1 juli och från den 1 juli till vegetationssäsongens slut. Temperaturgränsen $+5^{\circ}\text{C}$ valdes med hänsyn till växtlighetens normala krav för att kunna påbörja finrotillväxt och vattenupptagning. I modellen beräknas för hela året förutom lufttemperatursumman för hela året enligt ovan även köldmängden, dvs summan av de dygnsmedeltemperaturer i luften som underskrider 0°C . Dessa summor beräknas på årsbasis utifrån givna meteorologiska indata. Vegetationen är dock mycket känsligare för temperaturen i marken och dessutom är det endast markens och ej luftens temperatur som förändras vid ett artificiellt värmeuttag. Två varianter av viktade marktemperatursummor, båda beräknade som summan av den temperatur som överskrider $+5^{\circ}\text{C}$, har därför utnyttjats. Den första marktemperatursumman, T_1 , är viktad utgående från rotfördelningen i markens två översta skikt, 0—44 cm:s djup, medan den andra marktemperatursumman, T_2 , hänför sig till en viktning av markens påföljande tre skikt, 44—140 cm:s djup, (se Tabell 4). Summeringen sker dels över hela året och dels för delperioder fram till den 1 juni respektive fram till den 1 juli. Utifrån dessa perioder har sedan en tredje delperiod, som sträcker sig från den 1 juli till årets slut, räknats fram.

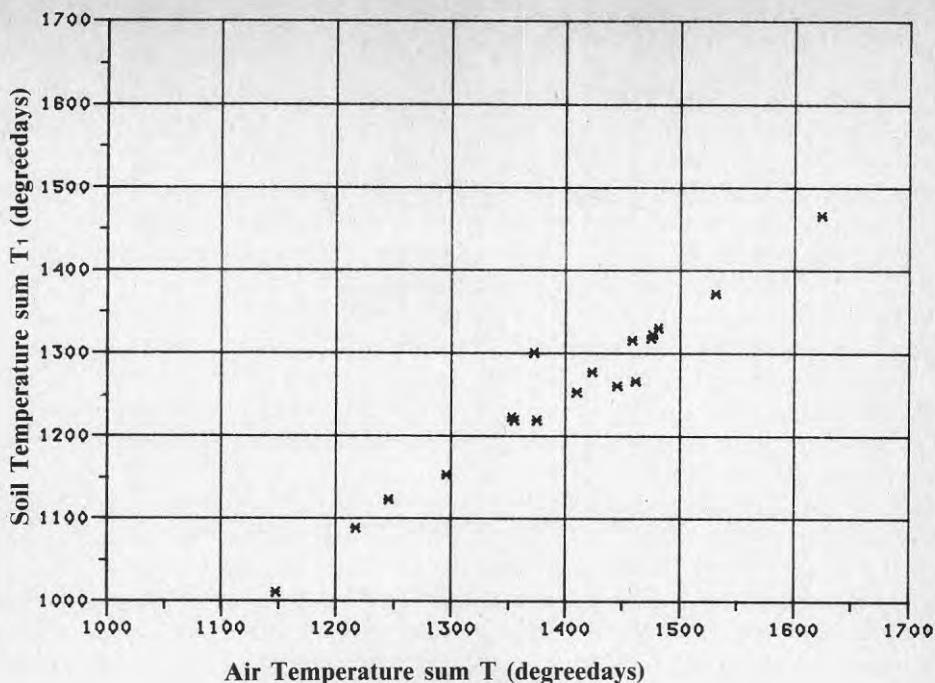
De perioder då summeringarna av marktemperatursummorna är aktiva framgår av Figur 10. I detta exempel, som illustrerar simulerade temperaturförhållandena i marken i Uppsala år 1966, dels vid naturliga förhållande och dels vid ett värmeuttag av $212 \text{ MJm}^{-2}\text{år}^{-1}$, startar summeringarna av temperatursumma T_1 först. Detta är naturligt då uppvärmningen på våren sker via markytan och följaktligen först påverkar den ytliga marktemperatursumman. Vid ett värmeuttag blir skillnaden i starttidpunkt för summeringarna ganska stor. Vid naturliga förhållanden avslutas summeringen av T_1 först. Detta beror på att de ytliga mark-

SOIL TEMPERATURES AT UPPSALA 1966
natural conditions



Figur 10. Simulerade marktemperaturer i de sex översta skikten i modellen (8, 30, 58, 86, 120 och 170 cm:s djup) under det kalla året 1965/66 i Uppsala för en sand med ytligt grundvattnet. Övre delen av figuren återger normala förhållande medan den undre delen återger förhållandena vid ett uttag av ca $200 \text{ MJm}^{-2}\text{år}^{-1}$. Vegetationssäsongen, som den definierats i modellen, samt början och slut på beräkningen av temperatursummorna T_1 och T_2 anges i figuren. De romerska siffrorna anger delperioder vid beräkningen av temperatursummorna.

skikten avkyls snabbare än de djupare liggande skikten när hösten inträder. Vid ett värmeuttag sker även en avkylning på värmeuttagsdjupet som får till följd att avkylningen av markprofilen går snabbare där. Temperaturer över $+5^\circ\text{C}$ bibehålls således längst i det ytliga markskiktet vilket leder till att den ytliga marktemperatursumman, T_1 , avslutas senare än den djupa. Detta medför, som framgår av figuren, till att summeringen av T_2 är verksam under en avsevärt kortare period, jämfört med summeringen av T_1 , vid ett värmeuttag. Lägg också märke till utjämnningen av temperaturen i markprofilen vintertid vid ett värmeuttag. Under sommaren, då markskikten runt uttagsnivån fortfarande var mycket kalla vid ett värmeuttag, erhöles istället en större temperaturskillnad i markprofilen.



Figur 11. Sambandet mellan den simulerade marktemperatursumman T_1 i sand med ytligt grundvatten och lufttemperatursumman i Uppsala under åren 1961–1979.

Tabell 5. Sambandet mellan marktemperatursumman (T_2) och lufttemperatursumman (T) för Kristianstad, Uppsala och Luleå. Koefficienterna är framtagna ur simuleringar av perioden 1961–1980.

Station	Samband	Anpassning (r^2)	Antal observationer
Kristianstad	$T_2 = 0.89T + 61$	0.94	20
Uppsala	$T_2 = 0.90T$	0.96	19
Luleå	$T_2 = 0.95T - 122$	0.92	20

Lufttemperatursummor, beräknade av Odin *et al.* (1983) som medel för hela Sverige, finns redovisade i Figur 9. Det finns ett starkt samband mellan de här beräknade marktemperatursummorna för mark utan värmeuttag och motsvarande lufttemperatursummor, speciellt för hela årssummor (Figur 11 och Tabell 5). För delar av vegetationssäsongen är sambandet sämre då marktemperaturen är fasförskjutet i förhållande till lufttemperaturen. Fäsförskjutningens storlek beror av faktorer som tjäljup, snötäcke och vattenhalt i marken och får därigenom en stor variation både mellan olika lokaler och mellan olika år. Sambanden mellan temperatursummorna blir också sämre för nordligt belägna stationer (Tabell 5) eftersom främst snö och tjäle där har ett starkt inflytande.

5.2 Vegetationssäsongen

En viktig faktor som bland annat styr vilken typ av växtlighet som kan odlas på en viss lokal är vegetationssäsongens längd. Denna period motsvarar i stort den tid då vegetationen har möjlighet att tillväxa. Flera försök har gjorts att fastställa början och slutet på vegetationssäsongen utifrån klimatvariabler. Odin *et al.* (1983) definierade vegetationssäsongen som den period då dygnsmedeltemperaturen i luften varaktigt överskred $+5^{\circ}\text{C}$. I analogi härmed definierades vegetationssäsongen som den period då dygnsmedeltemperaturen i marken (skiktet på 16–44 cm:s djup) varaktigt överskred $+5^{\circ}\text{C}$, dvs temperaturen får ej underskrida $+5^{\circ}\text{C}$ någon gång under 10 på varandra följande dagar. För att vegetationssäsongen ska avslutas krävs en sammanhängande femdagarsperiod med underskridande av den kritiska temperaturen. Denna definition ger, vid en jämförelse med en definition baserad på lufttemperaturen, en senareläggning av vegetationssäsongen men den överensstämmer i det storskaliga mönstret.

Den normala variationen av vegetationssäsongens längd för de tre utvalda orterna framgår av Tabell 3. I Figur 10 redovisas vegetationssäsongens början och slut som den utföll med den givna definitionen. Vanligen skedde ökningen av marktemperaturen relativt snabbt och oåterkalleligt, medan minskningen vid vegetationssäsongens slut var mera gradvis och gav större möjlighet för tillfälliga temperaturökningar att slå igenom. Detta problem blev speciellt märkbart då ett värmeuttag av sådan storlek gjordes att hösttemperaturen i de ytliga markskikten sänktes till $+5^{\circ}\text{C}$ -nivån. En viss slumpmässig variation i vegetationssäsongen, beroende på definitionen av denna, kan således förväntas.

6. Resultat

6.1 Markklimatets beroende av det årliga värmeuttaget för sex markprofiler

Körningarna av de primära simuleringsobjekten redovisas nedan i form av en genomgång av de utdata som presenterats tidigare. Presentationen har valts att göras så att erhållna utdata betraktas som variabler beroende av det årliga värmeuttaget.

Temperatursummorna T_1 och T_2 samt respektive delsummor beräknade på delar av vegetationssäsongen (se Figur 10) är redovisade som medelvärden för de tre utvalda åren (se Tabell 3) i Figur 12—15. På samma sätt är vegetationssäsongens början, slut och längd samt maximalt tjäldjup och första tjälfria dag återgivna i Figur 16—20. I varje figur återges temperatursummor för sandjordsprofilen med djupt grundvatten vid olika värmeuttag (figurernas vänstra del) samt skillnaden mellan temperatursummorna för de övriga markprofilerna och sandjordsprofilen (figurernas högra del). Endast de ytliga skiktens temperatursummor är återgivna som beräknade differenser mellan olika markprofiler för de tre utvalda orterna Kristianstad, Uppsala och Luleå.

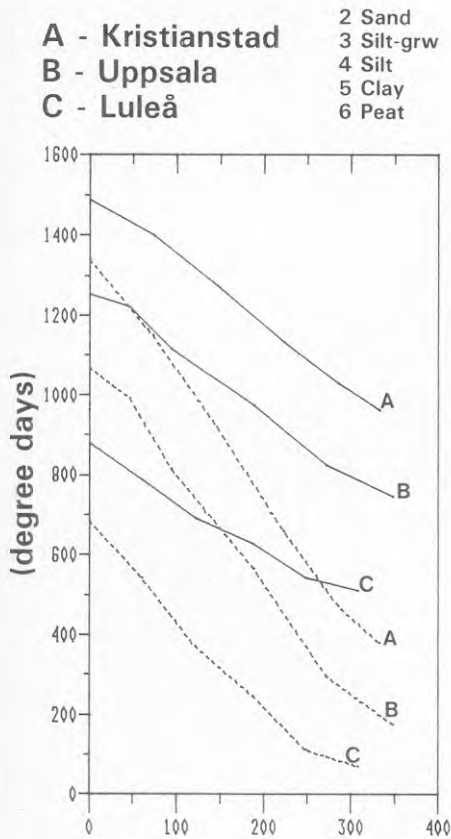
Temperatursummorna samt de övriga måtten på markklimatet uppvisar ofta linjära eller delvis linjära samband med det årliga värmeuttaget. I Figur 21—26 har därför skattade linjära koefficienter (intercept och lutningar) återgivits för de samband som visas i Figurerna 12-20. Vegetationssäsongens längd är dock utelämnad av utrymmesskäl. Alla regressioner är anpassade till fyra eller sex olika värmeuttag. Koefficienterna för enskilda år återfinns i Appendix 1.

6.1.1 Temperatursummor

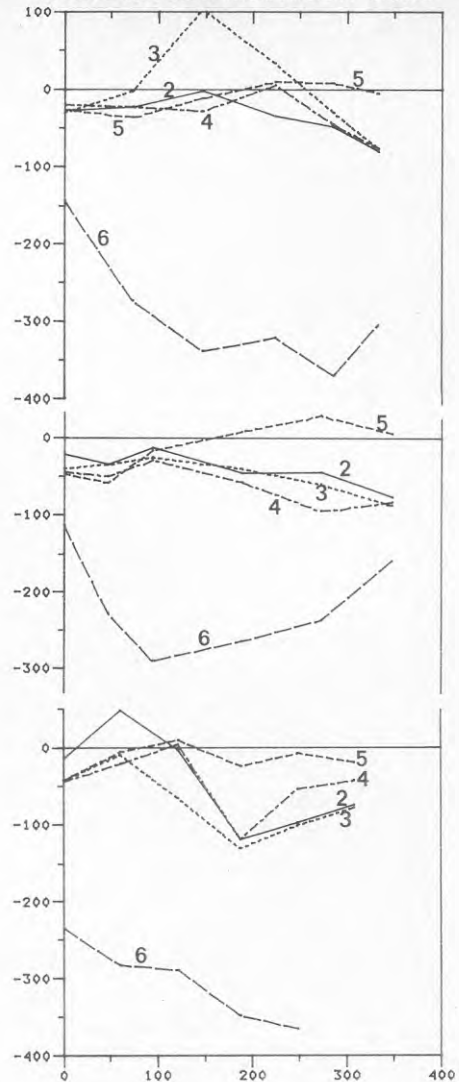
Marktemperatursummorna T_1 och T_2 , representerande 0—44 och 44—140 cm:s djup, påverkades av värmeuttaget på ett likartat sätt vid de tre orterna (Figur 12). De två temperatursummorna reagerade dock mycket olika för värmeuttag. Vid naturliga förhållanden var det djupare skiktets temperatursumma, T_2 , i alla orterna 150—200 graddagar lägre än temperatursumman T_1 . Vid ett värmeuttag ökade differensen mellan ytskiktets och det djupare skiktets temperatur. Detta var speciellt märkbart i Kristianstad.

Sambanden var i stort linjära men en tendens till ett utflackat förlopp vid stora värmeuttag fanns, speciellt märkbart i Luleå. Denna tendens till ett mindre beroende vid stora värmeuttag finns hos flertalet av de beräknade temperatursummorna. Tendensen indikerade att temperatursummorna påverkas upp till en viss nivå, men inte längre. Oavsett hur stort värmeuttaget varit under vintern kom markens ytliga skikt att värmas upp till en viss miniminivå. Detta kan förklaras av det relativt sett låga värmeuttaget under sommaren (se Figur 6), men det kan också vara en följd av modellantagandet att markytans temperatur alltid kommer att anta luftens medeltemperatur oavsett värmeuttagets storlek. Ett stort värmeuttag kom därför främst att påverka djupt liggande skikt. Tidigare erfarenheter har visat att modellantagandet om markytans temperatur var acceptabelt upp till ett värmeuttag motsvarande ca 200—250 MJm⁻²år⁻¹ i Uppsalatrakten. Vid ett större värmeuttag kom även markytan att vara något påverkad av värmeuttaget (Troedsson *et al.*, 1982) vilket innebar att modellen sannolikt underskattade effekten av stora värmeuttag (> 250 MJm⁻²år⁻¹).

Temperature sums whole period



Differences between soils



Annual heat extraction ($\text{MJm}^{-2}\text{year}^{-1}$)

Figur 12. Temperatursummorna T_1 , 0–44 cm:s djup, (heldragen linje) och T_2 , 44–140 cm:s djup, (streckad linje) för hela perioden i en sandjord med ytligt grundvatten som funktion av årligt värmeuttag (medelvärden av tre utvalda år, se Tabell 3) i Kristianstad (A), Uppsala (B) och Luleå (C). Figurens vänstra del återger skillnaden i temperatursumman T_1 mellan övriga jordar och sandjorden med ytligt grundvatten för de tre orterna.

Skillnaderna mellan de olika jordarterna för temperatursumman T_1 , återgivna med sandjordsprofilen med djupt grundvatten som referens, uppvisade ett delvis liknande förlopp för de tre orterna (Figur 12). Torvmarksprofilen (profil 6) var för samtliga orter mycket kallare än referensjorden, både vid naturliga förhållanden och vid olika värmeuttag. Vid naturliga förhållande var skillnaden störst i Luleå, men vid ett värmeuttag större än $100 \text{ MJm}^{-2}\text{år}^{-1}$ blev skillnaden jämfört med referensen minst 200 graddagar för samtliga orter. Notera dock att den relativa förändringen blev mycket större i Luleå. De låga temperaturerna som där erhöles i torvmarken innebar minimala möjligheter för biologisk aktivitet.

Den varmaste markprofilen var som regel sanden med djupt beläget grundvatten (referensen = profil 1). Detta gällde för samtliga orter vid naturliga förhållanden. När ett värmeuttag gjordes närmade sig ibland övriga mineraljordars temperatursummor referensjordens. Speciellt leran (profil 5) blev relativt referensen allt varmare vid värmeuttag. I Kristianstad och Uppsala var den tendensen tydlig även vid de största värmeuttagen medan tendensen upphörde vid stora värmeuttag i Luleå.

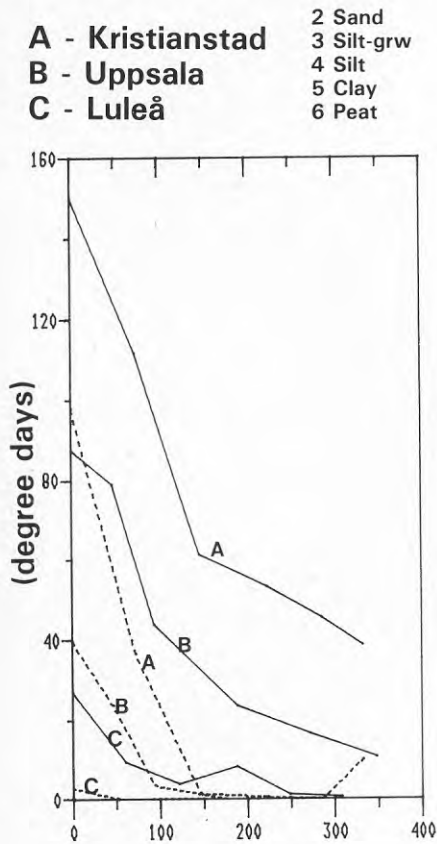
De bägge profilerna med silt och sand med ytligt grundvatten uppvisade alla ett snarlikt förlopp. De var något kallare (ca 20—40 graddagar) än referensen vid naturliga förhållanden och förblev också kallare vid måttliga värmeuttag. Silten med djupt beläget grundvatten (profil 3) närmade sig dock referensprofilen och blev i Kristianstad till och med varmare än referensen vid ett av värmeuttagen.

Skillnaderna mellan de olika markprofilerna vad gäller temperatursumman T_1 :s känslighet för värmeuttagets storlek kan förklaras utgående från profilernas termiska egenskaper. Här är både markens lagringsegenskaper för värme (värmekapaciteten) och dess värmeledningsegenskaper (termiska konduktiviteten) betydelsefulla. Varma jordar karaktäriseras under naturliga förhållande av hög värmeledningsförmåga och liten värmekapacitet. Vid ett värmeuttag kommer främst is- och temperaturfördelningen i markprofilen att bli betydelsefull. För jordar där tjälén tränger långt ner behövs relativt lite energi för upptining och uppvärmning av ytskiktet; sand med låg vattenhalt är här typexemplet. Även i lera kan dock tjälén tränga djupare ner än i vattenmättad sand eller silt på grund av den låga rörligheten hos det ofrusna vattnet och den partiella frysningen som sker i styva leror. Vid tolkningen av jordartsberoendet hos temperatursummornas påverkan av olika värmeuttag är därför tjälens maximala nedträngande av central betydelse (se Figur 21).

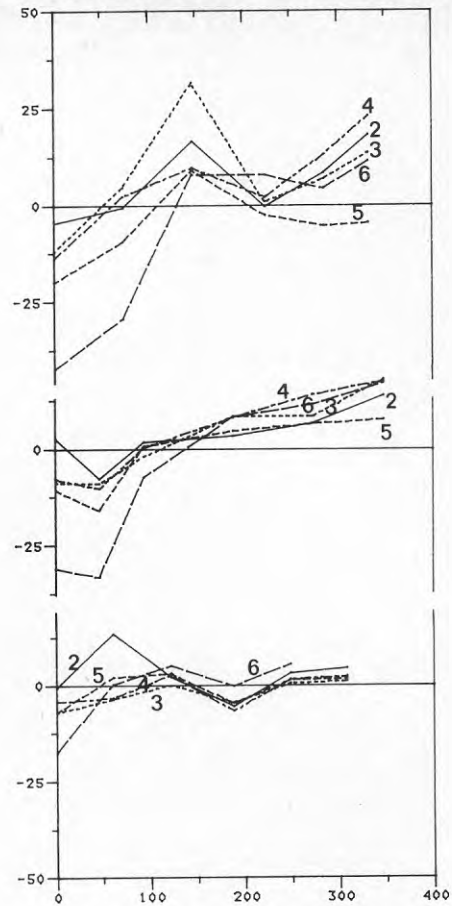
De djupare skiktens temperatursumma T_2 uppvisade ett beroende av markprofilerna som i de stora dragen väl stämde överens med det mönster som gällde för de ytliga skiktens temperatursumma.

Den relativa förändringen av marktemperaturen vid ett värmeuttag var störst i början av vegetationssäsongen. Detta framgår av Figur 13 som visar temperatursummorna T_1 och T_2 för den första delperioden, fram till den 1 juni. Temperatursummorna var under denna period mindre än 10% av de totala för året, i Luleå var den i stort sett noll, men betydelsen för de biologiska processerna är troligen avsevärt större då en viss värmemängd alltid måste tillföras innan någon biologisk aktivitet överhuvudtaget vidtar. Ett uttag av $125 \text{ MJm}^{-2}\text{år}^{-1}$ halverade i stort sett den första delperiodens temperatursumma T_1 både för Kristianstad och Uppsala medan samma uttag endast sänkte temperatursumman för hela året med 12—15 %. I de djupare skikten halverades motsvarande temperatursumma, T_2 , vid ett värmeuttag av $60 \text{ MJm}^{-2}\text{år}^{-1}$. Denna drastiska förändring av temperatursumman kan betraktas som den relativt sett största effekten av ytjordvärmeuttag.

Temperature sums 1st subperiod



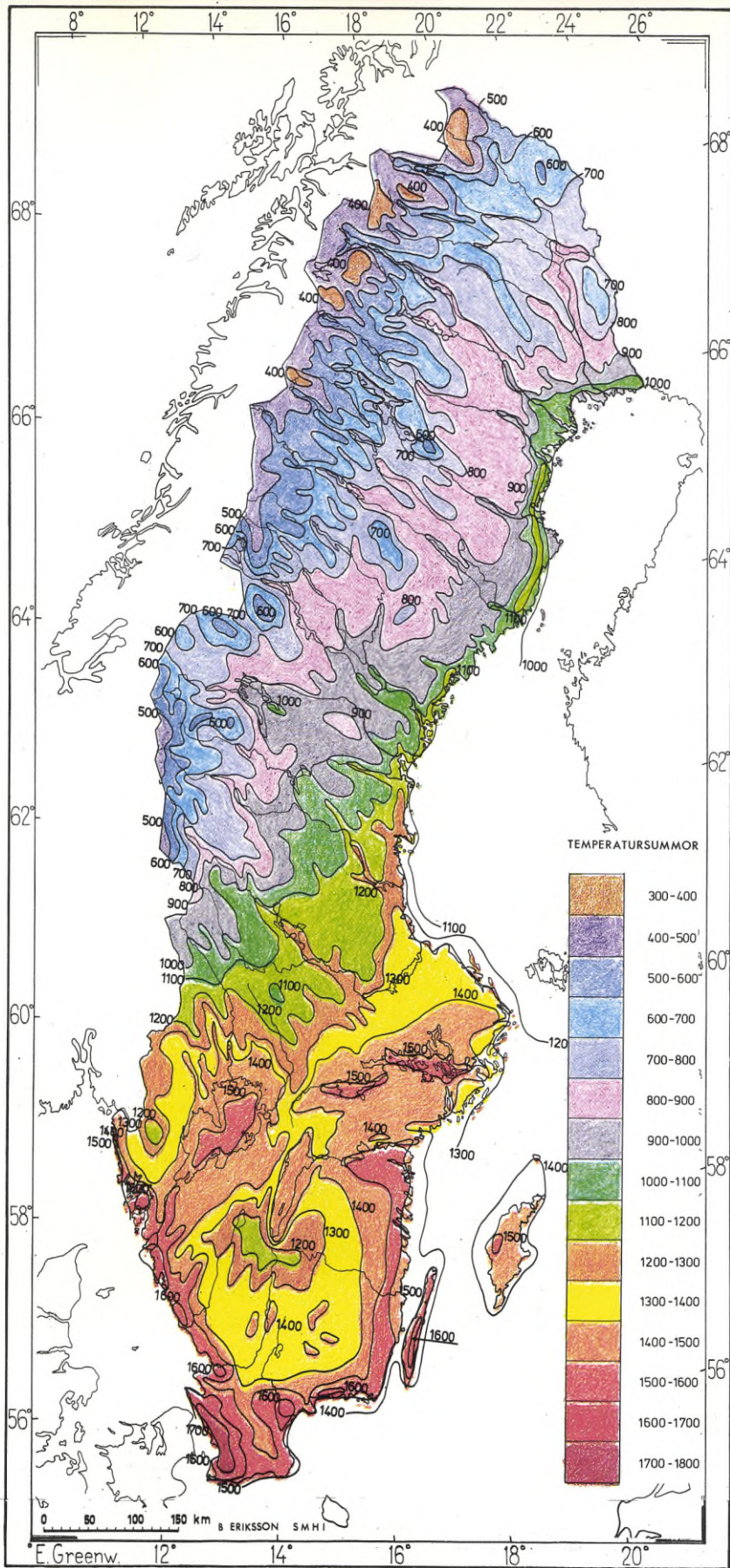
Differences between soils



Annual heat extraction ($\text{MJm}^{-2}\text{year}^{-1}$)

Figur 13. Temperatursummorna T_1 , 0–44 cm:s djup, (heldragen linje) och T_2 , 44–140 cm:s djup, (streckad linje) för den första delperioden, från start fram till den 1 juni i en sandjord med ytligt grundvatten som funktion av årligt värmeuttag (medelvärden av tre utvalda år, se Tabell 3) i Kristianstad (A), Uppsala (B) och Luleå (C). Figurens vänstra del återger skillnaden i temperatursumman T_1 mellan övriga jordar och sandjorden med ytligt grundvatten för de tre orterna.

Figur 9. Lufttemperatursummor för Sverige beräknade under vegetationssäsongen för perioden 1931–1960. (Figur 7. i Odin *et al.*, 1983).



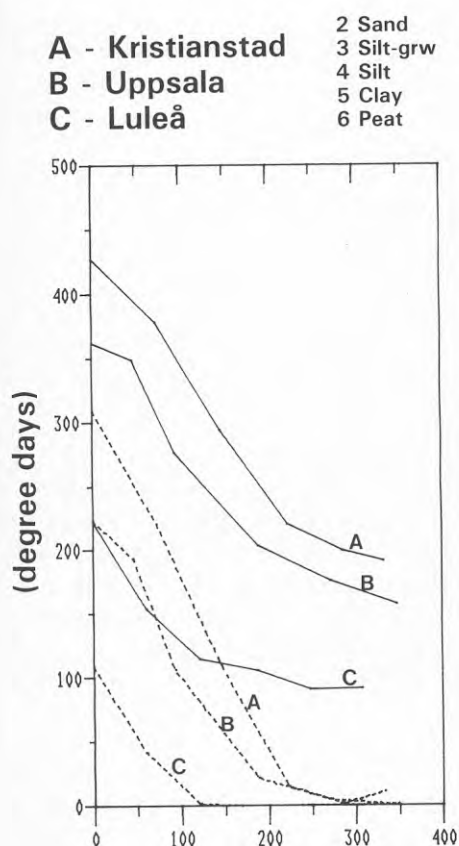
Vad gäller jordartsberoendet konstaterades att främst torvens uppträdande var annorlunda jämfört med temperatursumman för hela året. Torven, som vid naturliga förhållande fortfarande var klart kallast, kom att framstå som en av de varmaste profilerna i ytskiktet vid ett måttligt värmeuttag. Detta något överraskande resultat kunde tillskrivas torvens höga värmekapacitet i kombination med dess extremt låga termiska konduktivitet. Den tjäle som bildats vid värmeuttagsdjupet spred sig inte mycket utan tjälningen var helt koncentrerad till ett djup. Tidigt på våren kunde då markens ytskikt vara nästan helt otjälrat och därigenom snabbt värmas upp. Fortsatt uppvärmning kom dock att gå mycket långsamt eftersom energin åtgick för upptining av den djupare belägna tjälen och endast små värmemängder kunde tillföras på grund av den låga termiska konduktiviteten. I den situation då torvens temperatur blev jämbördig med övriga mineraljordar var alla jordar mycket kalla, dvs strax över 5°C.

En annan skillnad i jordartsberoendena var att referensen, dvs sanden med djupt grundvatten, och även leran, som bägge framstod som de varmaste jordarna för hela årets temperatursumma, nu blev betydligt kallare än de övriga jordarna, speciellt vid stora uttag. Detta kan förklaras av att tjälen spred sig effektivt från värmeuttagsdjupet till markens ytligaste skikt i dessa jordar. Vatten från snösmältningen eller tidiga vårregn kunde då frysa nära markytan och sedan åstadkomma en kraftig försening av den tidiga uppvärmningen av marken.

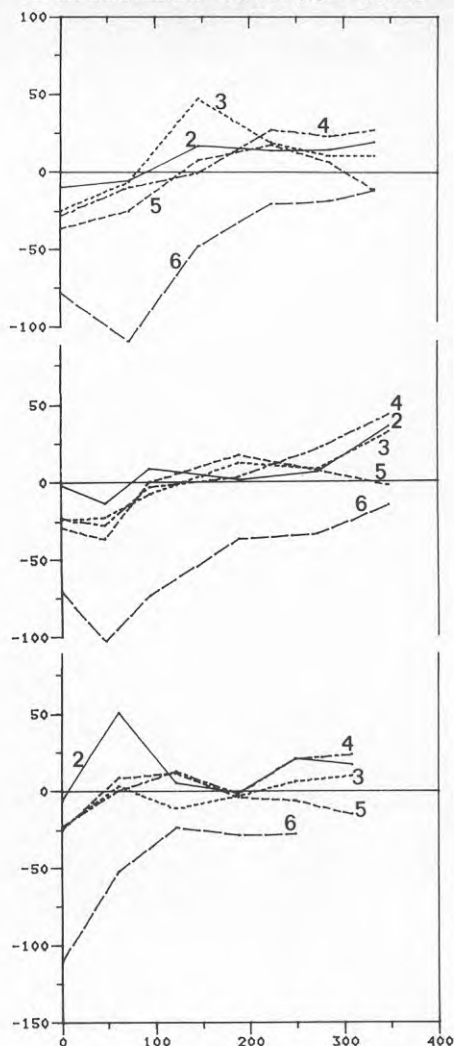
Temperatursummorna T_1 och T_2 :s relativa förändring vid värmeuttag blev för den andra delperioden, fram till den 1 juli, betydligt mindre (Figur 14) än för den första perioden (Figur 13). Mönstret för temperatursummornas påverkan var mycket likt det som rådde för den första delperiodens temperatursummor. En skillnad var dock att orternas olikheter i klimat inte var lika påtaglig här. Temperatursummorna på de olika orterna reagerade också likartat på ett värmeuttag upp till en viss nivå, där en utplaning skedde mot ett minimivärde för temperatursumman. Detta värde var olika för orterna och skillnaderna var relativt sett ungefärligen lika stora som vid naturliga förhållanden. För de djupare skikten var förhållandet likartat, men med den skillnaden att miniminivån var gemensam och nära noll för alla orter.

Skillnaderna mellan de olika jordarterna var för den andra delperioden beroende av orten. Tendenserna känns dock igen för samtliga orter både från hela periodens temperatursummor (Figur 12) och från den första delperiodens temperatursummor (Figur 13). För Luleå var jordarternas förhållande till referensen delvis likt det som gällde för hela perioden, främst vad gäller den torra sandens och siltprofilernas förlopp. Temperatursumman för lerprofilen var här, till skillnad från hela periodens temperatursumma, nästan alltid lägre än referensjordens. Torvprofilen hade vid naturliga förhållanden (inget värmeuttag) en lägre temperatursumma än referensjorden, precis som för hela perioden, men kom vid värmeuttag att beskriva ett förlopp som liknade lerans. I intervallet 100 till 200 MJm^{-2} år^{-1} blev temperatursummorna för lera och torv mycket lika, vilket kontrasterade mot motsvarande temperatursummor för hela perioden, då leran liknade referensprofilen medan torven var betydligt kallare (—300 graddagar) jämfört med referensen.

Temperature sums 2nd subperiod

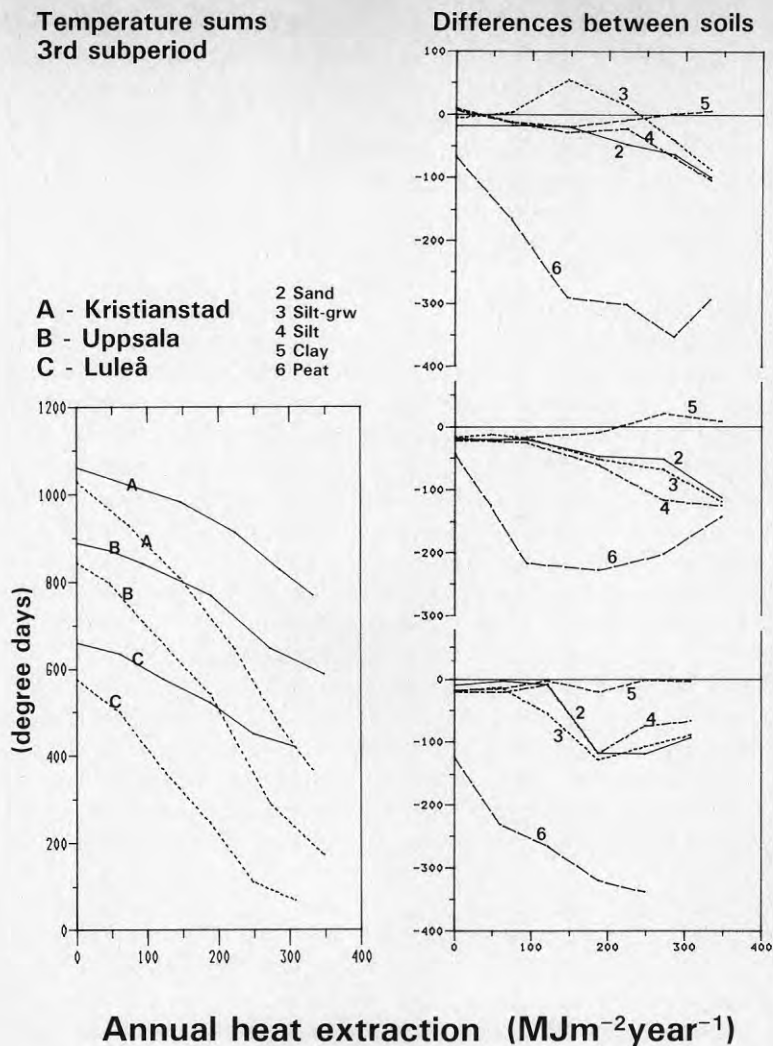


Differences between soils



Annual heat extraction ($\text{MJm}^{-2}\text{year}^{-1}$)

Figur 14. Temperatursummorna T_1 , 0-44 cm:s djup, (heldragen linje) och T_2 , 44-140 cm:s djup, (streckad linje) för den andra delperioden, från start fram till den 1 juli i en sandjord med ytligt grundvatten som funktion av årligt värmeuttag (medelvärden av tre utvalda år, se Tabell 3) i Kristianstad (A), Uppsala (B) och Luleå (C). Figurens vänstra del återger skillnaden i temperatursumman T_1 mellan övriga jordar och sandjorden med ytligt grundvatten för de tre orterna.



Figur 15. Temperatursummorna T_1 , 0–44 cm:s djup, (heldragen linje) och T_2 , 44–140 cm:s djup, (streckad linje) för den tredje delperioden, från den 1 juli till slut i en sandjord med ytligt grundvatten som funktion av årligt värmeuttag (medelvärden av tre utvalda år, se Tabell 3) i Kristianstad (A), Uppsala (B) och Luleå (C). Figurens vänstra del återger skillnaden i temperatursumman T_1 mellan övriga jordar och sandjorden med ytligt grundvatten för de tre orterna.

Den tredje delperioden, från den 1 juli, svarade för det mest betydelsefulla tillskottet till de totala temperatursummorna, men känsligheten för värmeuttagets storlek var dock relativt sett avsevärt mindre (Figur 15). Det värmeuttag ($125 \text{ MJm}^{-2}\text{år}^{-1}$) som halverade den första delperiodens temperatursumma, T_1 , i Kristianstad åstadkom för denna period en sänkning med endast ca 10% i samtliga orter. Av naturliga skäl kom temperatursummornas beroende av värmeuttaget för de olika profilerna på de olika orterna att beskriva ett likartat förlopp som för hela periodens temperatursumma (Figur 12).

6.1.2 Vegetationssäsongen

Ett värmeuttag kan medföra att vegetationssäsongens början senareläggs åtskilligt (Figur 16) men också att säsongens slut tidigareläggs (Figur 17). Känsligheten för förändringar av vegetationssäsongen var i hög grad beroende av orten. För Kristianstad erhöles en försening med en månad vid ett uttag av $125 \text{ MJm}^{-2}\text{år}^{-1}$ vilket skall jämföras med en motsvarande försening på ca två veckor i Luleå, där årstidsväxlingarna således dominerade. Slutet av vegetationssäsongen påverkades mer likartat för de olika orterna; detta tidigarelades med knappt två veckor vid ett uttag av $125 \text{ MJm}^{-2}\text{år}^{-1}$.

För både början och slutet av vegetationssäsongen visade torvprofilen det största beroendet av värmeuttaget. Vid ett naturligt tillstånd påbörjades vegetationssäsongen 10-35 dagar senare i torven än i referensjorden. Denna skillnad bibehölls eller ökade vid ett värmeuttag, vilket gjorde att vegetationssäsongen i vissa fall helt uteblev. I Luleå inträffade detta vid ett värmeuttag av $150 \text{ MJm}^{-2}\text{år}^{-1}$ medan motsvarande värmeuttag var omkring $300 \text{ MJm}^{-2}\text{år}^{-1}$ i Uppsala. Vegetationssäsongens slut inträffade vid naturliga förhållande i torven ca fem dagar efter referensjorden. Vid ett värmeuttag blev situationen den omvända med en allt större tidigareläggning av vegetationssäsongens slut för torven i förhållande till referensjorden.

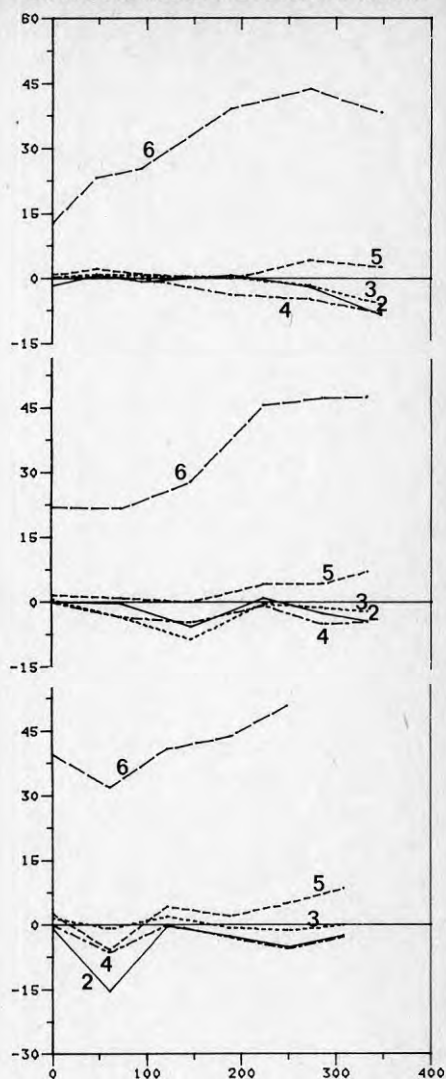
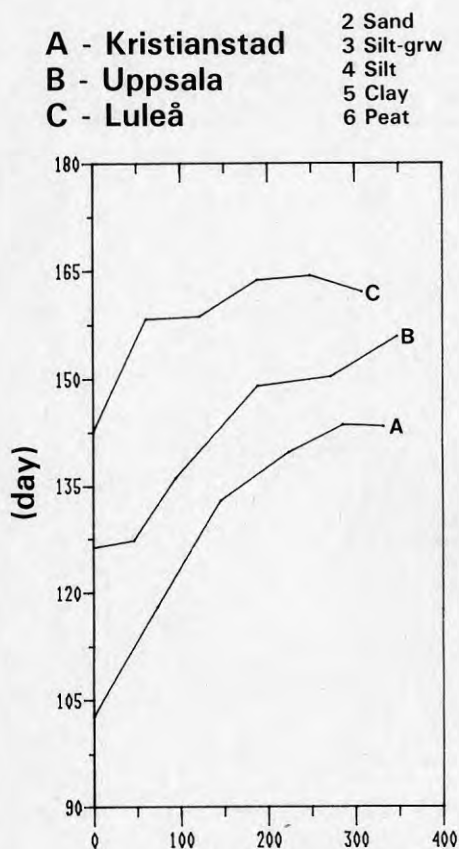
Övriga jordar uppvisade betydligt mindre variationer i förhållande till referensen än vad torven gjorde, främst bland de övriga märktes leran som jämfört med referensen blev försenad både vid början och slutet av vegetationssäsongen vid värmeuttag. Vegetationssäsongens längd förkortades på ett liknande sätt på alla orterna (Figur 18) och som framgick av vegetationssäsongens början och slut intog torven även här en särställning bland jordarna. Siltprofilerna tillsammans med sandprofilen med ytligt beläget grundvatten var som regel de profiler som visade minst beroende av värmeuttaget. Leran och den torra sanden var något mer benägna att förkorta sina respektive vegetationssäsonger vid värmeuttag men skillnaderna var små och ej helt systematiska.

6.1.3 Tjälldjup och upptining

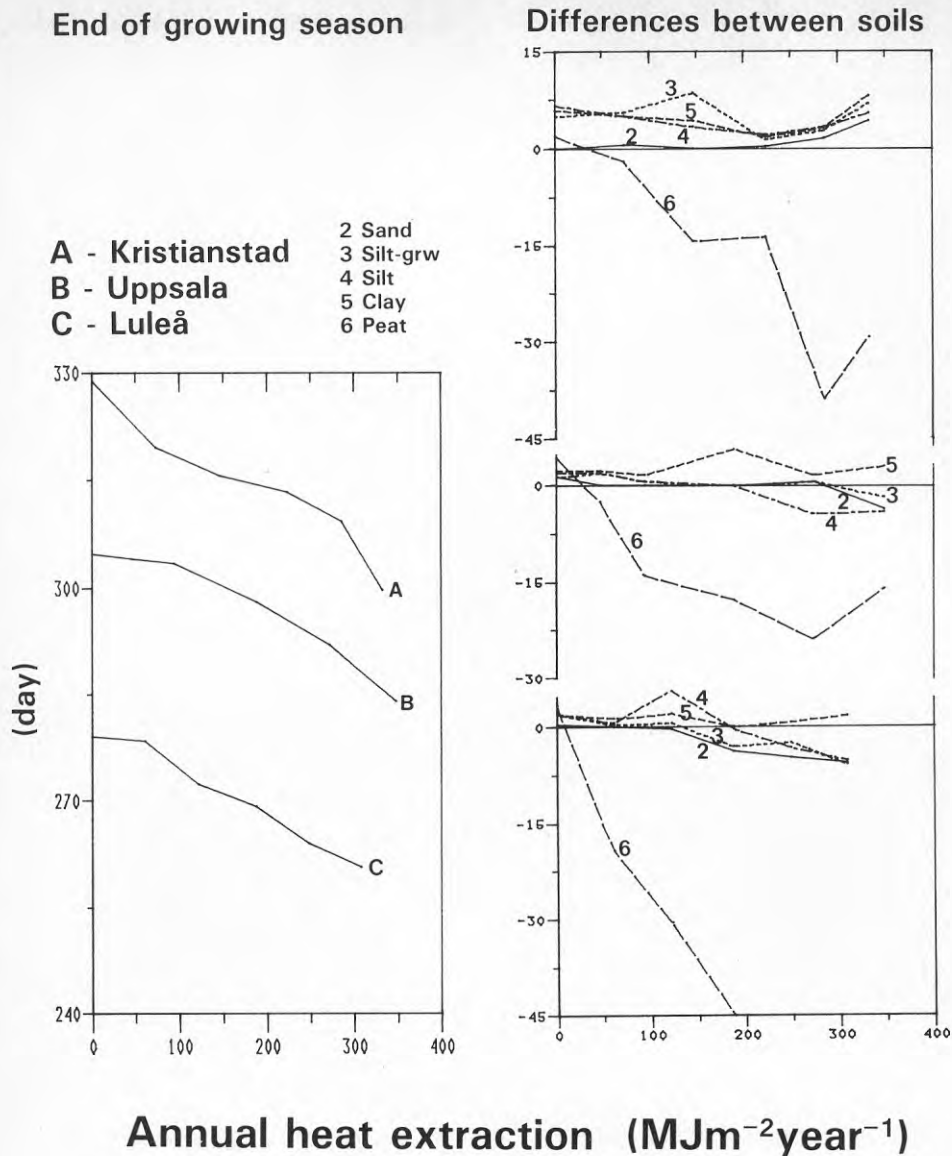
Till skillnad från övriga här diskuterade mått på markklimatet utgör det maximala tjälldjupet en variabel som skiljer sig relativt lite mellan orterna i förhållande till dess känslighet för värmeuttag. Vid naturliga förhållande var skillnaden givetvis relativt stor mellan orterna, men vid större värmeuttag var det nästan enbart markens egenskaper som blev avgörande för tjälldjupet (Figur 19). Jordarna kunde graderas i följande ordning efter motstånd mot påverkan; silt med grundvatten, sand med grundvatten, silt utan grundvatten, torv, lera och slutligen sand utan grundvatten. Ordningsföljden var i stort sett densamma vid alla orter och värmeuttag. Avgörande för tjälens nedträngande vid naturliga förhållande är

Start of growing season

Differences between soils

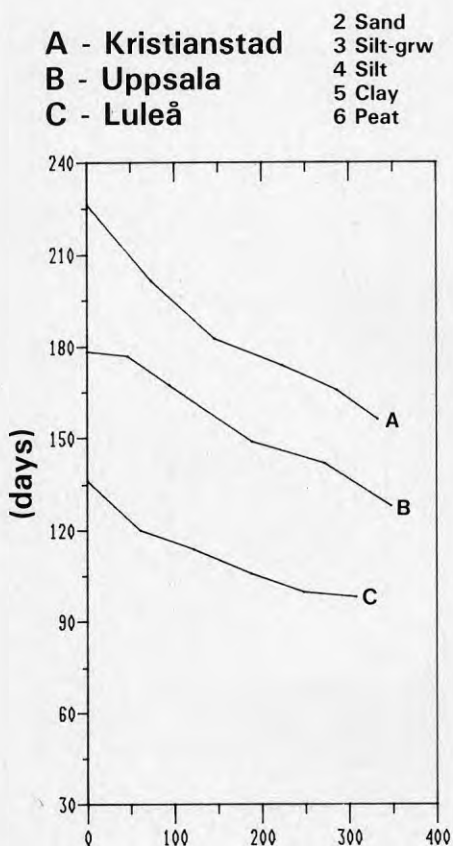
Annual heat extraction (MJm⁻²year⁻¹)

Figur 16. Dagnummer för vegetationssäsongens början i en sandjord med ytligt grundvatten som funktion av årligt värmeuttag (medelvärden av tre utvalda år, se Tabell 3) i Kristianstad (A), Uppsala (B) och Luleå (C). Figurens vänstra del återger skillnaden mellan övriga jordar och sandjorden med ytligt grundvatten för de tre orterna.

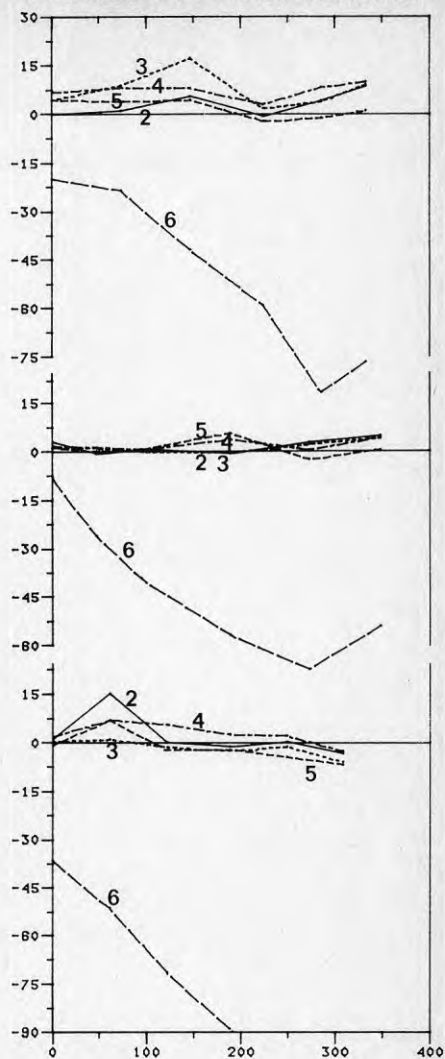


Figur 17. Dagnummer för vegetationssäsongens slut i en sandjord med ytligt grundvatten som funktion av årligt värmeuttag (medelvärden av tre utvalda år, se Tabell 3) i Kristianstad (A), Uppsala (B) och Luleå (C). Figurens vänstra del återger skillnaden mellan övriga jordar och sandjorden med ytligt grundvatten för de tre orterna.

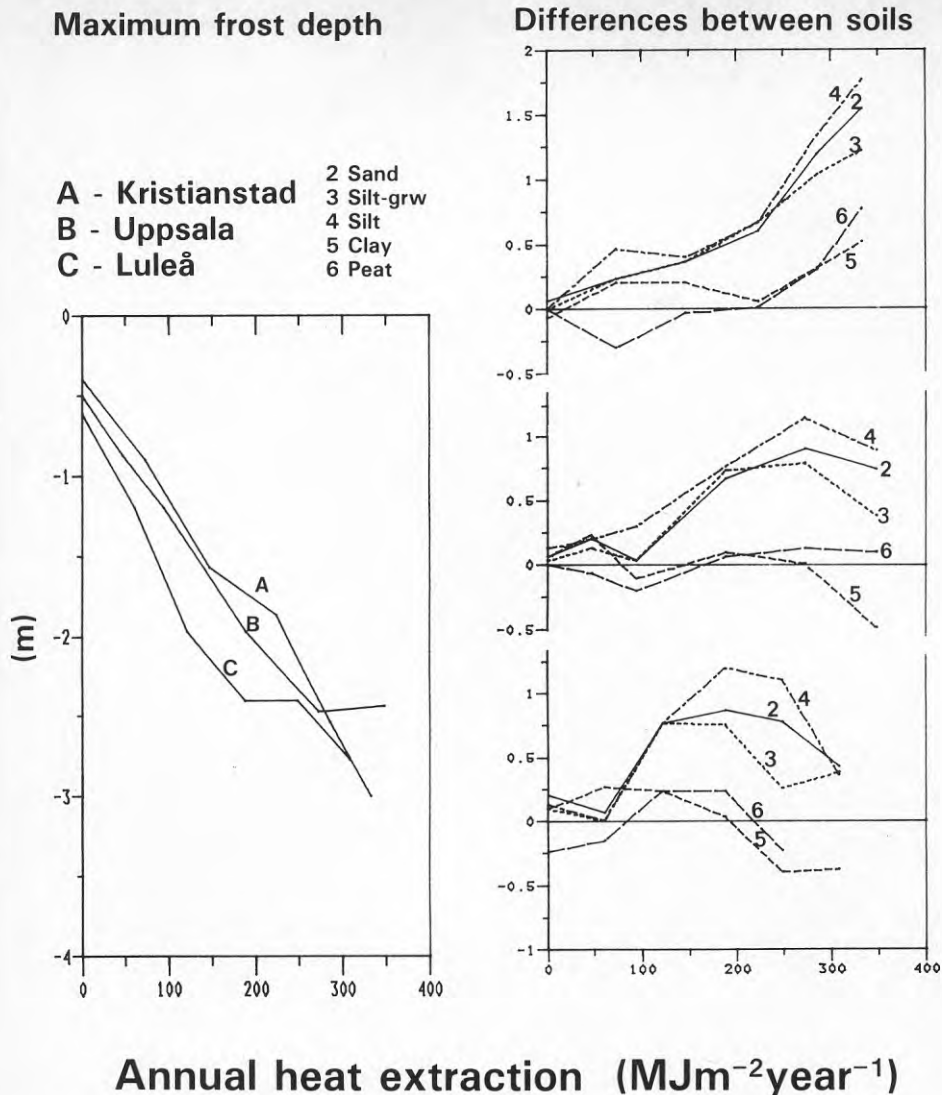
Length of growing season



Differences between soils

Annual heat extraction (MJm⁻²year⁻¹)

Figur 18. Vegetationssäsongens längd i en sandjord med ytligt grundvatten som funktion av årligt värmeuttag (medelvärden av tre utvalda år, se Tabell 3) i Kristianstad (A), Uppsala (B) och Luleå (C). Figurens vänstra del återger skillnaden mellan övriga jordar och sandjorden med ytligt grundvatten för de tre orterna.



Figur 19. Maximalt tjäldjup i en sandjord med ytligt grundvatten som funktion av årligt värmeuttag (medelvärden av tre utvalda år, se Tabell 3) i Kristianstad (A), Uppsala (B) och Luleå (C). Figurens vänstra del återger skillnaden mellan övriga jordar och sandjorden med ytligt grundvatten för de tre orterna.

både den termiska konduktiviteten och den apparenta värmekapaciteten, summan av latent värme och sensibel värmekapacitet, som nästan helt domineras av den latent värmen. Vid ett värmeuttag kommer i stort sett enbart mängden lättillgängligt vatten att bli avgörande eftersom värmetransporten via kollektorn i marken ej är begränsande. I siltprofilerna, med dess relativt höga omättade konduktiviteter, sker också en kraftig omfördelning av vatten, speciellt vid det ytliga grundvattenståndet. För torven och leran är en relativt stor mängd vatten ofruset vid -1°C , vilket förklarar deras stora benägenhet för djup tjälning vid ett värmeuttag. Vid naturlig tjälning begränsas tjäldjupet normalt av dessa jordars dåliga värmeledningsegenskaper.

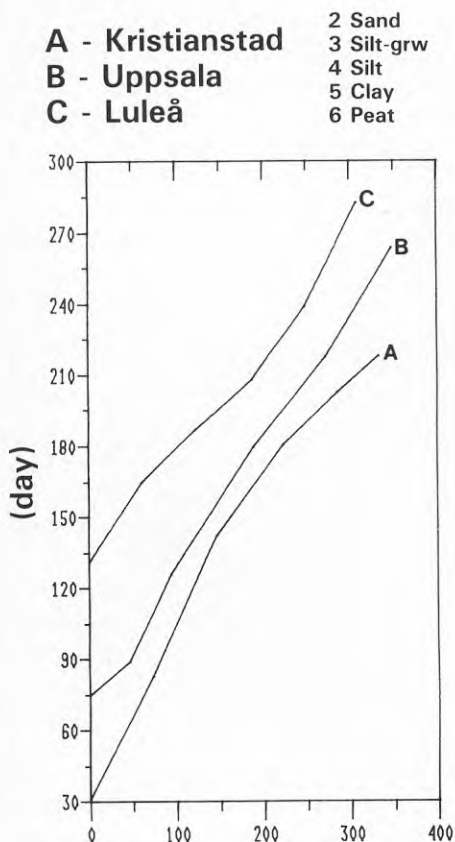
Datum då tjälen är helt tinad i profilen är en ytterst viktig och framförallt en av värmeuttaget starkt påverkad variabel. För denna variabel kommer, till skillnad från maximala tjäldjupet, både markens värmetransports- och värmelagrings-egenskaper att bli avgörande. Effekten på tidpunkten för helt tinad profil (Figur 20) skiljde sig på flera punkter från effekten på temperatursummorna och på vegetationssäsongen. Först kan konstateras att vi kunde åstadkomma skenbara förflyttningar av de sydliga orterna norrut, genom att ta ut värme tills dess att de naturliga förhållandena för den nordliga orten erhålls. Genom att i Kristianstad och Uppsala ta ut 150 respektive 110 $\text{MJm}^{-2}\text{år}^{-1}$ förflyttar vi oss till ostörd mark i Luleå. För att flytta referensjorden till Luleå i termer av temperatursumman T_1 krävdes ett värmeuttag av ca 450 respektive 275 $\text{MJm}^{-2}\text{år}^{-1}$ för Kristianstad och Uppsala (Figur 12). Sedd ur vegetationssäsongens längds synvinkel (Figur 18) var förflyttningen ouppnåelig för Kristianstad och skulle ha krävt ca 350 $\text{MJm}^{-2}\text{år}^{-1}$ för Uppsala. De stora skillnaderna i värmeuttag som krävdes för att åstadkomma en förflyttning i termer av en specifik variabel återspeglar i stort sett de olika djup i profilen som respektive variabler på något sätt representerar. Tidpunkten för tjälfri mark ger då ett mått på hur förhållandena har ändrats djupare ner i markprofilen jämfört med temperatursumman T_1 och vegetationssäsongens längd.

Jordartsberoendet hos tidpunkten för tjälfri mark var också, med undantag för torven, helt skilt från temperatursummornas jordartskänslighet vad gäller beroendet av värmeuttaget. Sanden utan grundvatten var här den känsligaste mineraljorden medan den för temperatursumman var den okänsligaste. Även lera och silt utan grundvatten var här känsligare än referensen, vilket är det omvända mot förhållandet för temperatursumman. Sand med ytligt grundvatten och silt med ytligt grundvatten var minst känsliga för förändringar av tidpunkten för tjälfri mark. Torvens extrema egenskaper visades sig genom att upptiningen vid naturliga förhållande var upp till en månad senare än för referensen. Vid ett värmeuttag försköts tidpunkten för tjälfri mark ytterligare till mellan tre och fyra månader efter referensen. Detta innebar att risken för permafrost, här definierad som att tidpunkten för tjälfri mark är senare än dag 305 (1 nov), var uppenbar vid ett värmeuttag av 125, 200 respektive 250 $\text{MJm}^{-2}\text{år}^{-1}$ i Luleå, Uppsala och Kristianstad. För referensjorden skulle permafrost ha erhållits vid 325, 410 respektive 450 $\text{MJm}^{-2}\text{år}^{-1}$.

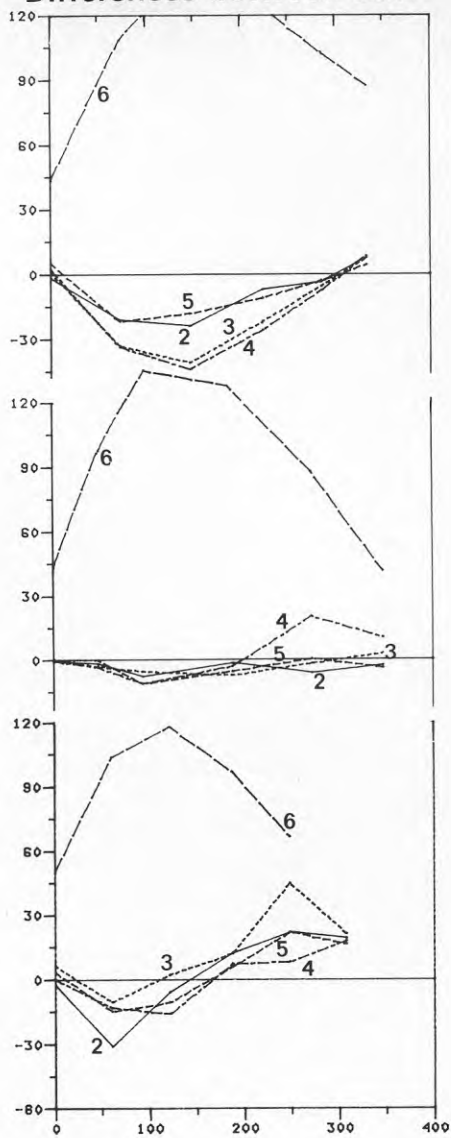
6.1.4 Skattade intercept och lutningar i sambanden mellan markvariabler och årligt värmeuttag

Tolkningen och diskussionen av de olika sambanden har delvis givits i samband med Kapitel 6.1.1—6.1.3. Här skall därför endast anpassningarnas säkerhet och koefficienternas beroende av mark, ort och klimatfaktorer belysas. Skattningar

First frost free day



Differences between soils

Annual heat extraction (MJm⁻²year⁻¹)

Figur 20. Första tjälfria dag i en sandjord med ytligt grundvatten som funktion av årligt värmeuttag (medelvärden av tre utvalda år, se Tabell 3) i Kristianstad (A), Uppsala (B) och Luleå (C). Figurens vänstra del återger skillnaden mellan övriga jordar och sandjorden med ytligt grundvatten för de tre orterna.

av intercept och lutningar för variablerna har gjorts med alla sex simulerade punkter som grund, men även med de fyra lägsta värmeuttagen som grund. Den mest tillförlitliga skattningen bör vara den med det färre antalet punkter eftersom modellens tillförlitlighet av flera skäl bedömts som sämre vid stora värmeuttag (se Kapitel 6.1.1).

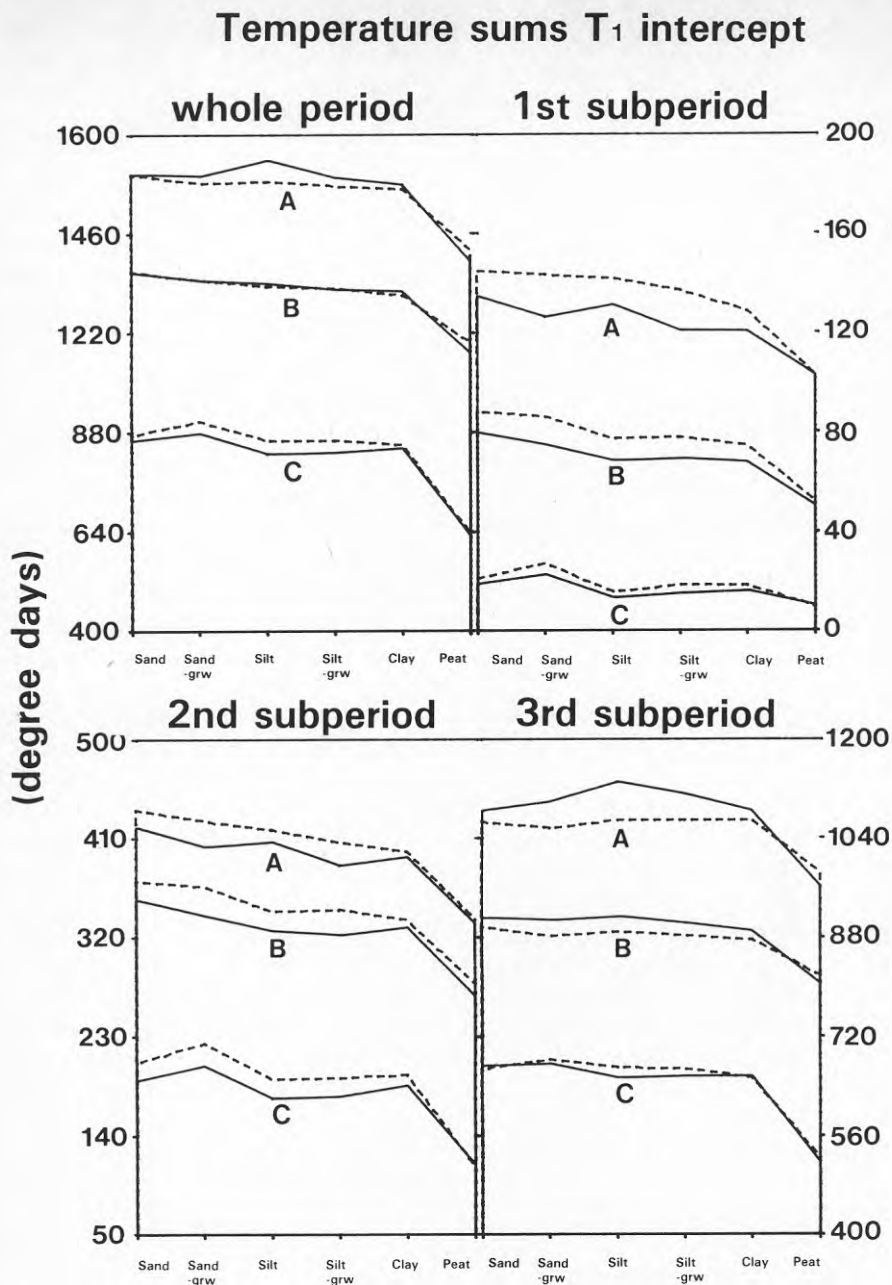
Temperatursumman T_1 och de till den skattade intercepten för hela perioden och för delperioderna återger de stora skillnader som rådde vid naturliga förhållanden på de olika orterna (Figur 21). För hela perioden och för den sista delperioden var skillnaderna i skattade intercept mellan fyra- och sexpunktersanpassningarna genomgående små. För den första och den andra delperioden märktes dock klara skillnader beroende på antalet medtagna punkter. Skillnaderna indikerar här en minskad känslighet för en ökning av värmeuttaget vid stora värmeuttag. De skattade intercepten var då större för anpassningen med fyra punkter än för anpassningen med sex punkter. För den sista delperioden märktes dock motsatsen för de två sydligaste orterna, vilket indikerade en ökad känslighet vid stora värmeuttag. Intercepten för de djupare skiktens temperatursummor, T_2 , är ej redovisade i figur eftersom de i det allmänna mönstret helt överensstämde med intercepten för de ytligare skiktens temperatursummor.

De skattade intercepten för maximalt tjäldjup återgav ett delvis oregelbundet mönster genom att stora skillnader erhöles beroende på hur många punkter som ingick i anpassningen (Figur 22). Avvikelserna var här av en till synes slumpmässig karaktär eftersom förändringen från anpassning med sex till anpassning med fyra punkter för vissa orter och jordar medförde ytligare tjälning medan den för en annan ort med samma jord medförde en djupare tjälning. Anledningen till att tjälen ej tillväxte linjärt vid ett värmeuttag var dels att den primära vattenhaltsfördelningen med djupet var olika och dels att vattnet omfördelades i samband med frysningen. Dessa faktorer kan ha spelat olika stor roll i de olika orterna. Dessutom kan, som tidigare nämnts, skiktens tjockleksfördelning, med mäktigare skikt på ökat djup, ha spelat en viss roll.

Skattade intercept för första tjälfria dag skiljde sig mycket beroende på orten, men skillnaderna var små och relativt regelbundna beroende på antalet punkter vid anpassningen. Noterbara var också skillnaderna i jordartsberoende mellan orterna. För Uppsala var alla mineraljordar mycket lika, medan sand med djupt grundvatten i Kristianstad och Luleå var tjälfria vid en något senare tidpunkt än de andra mineraljordarna. Torven skiljde sig mer från mineraljordarna än vad orterna skiljde sig åt sinsemellan.

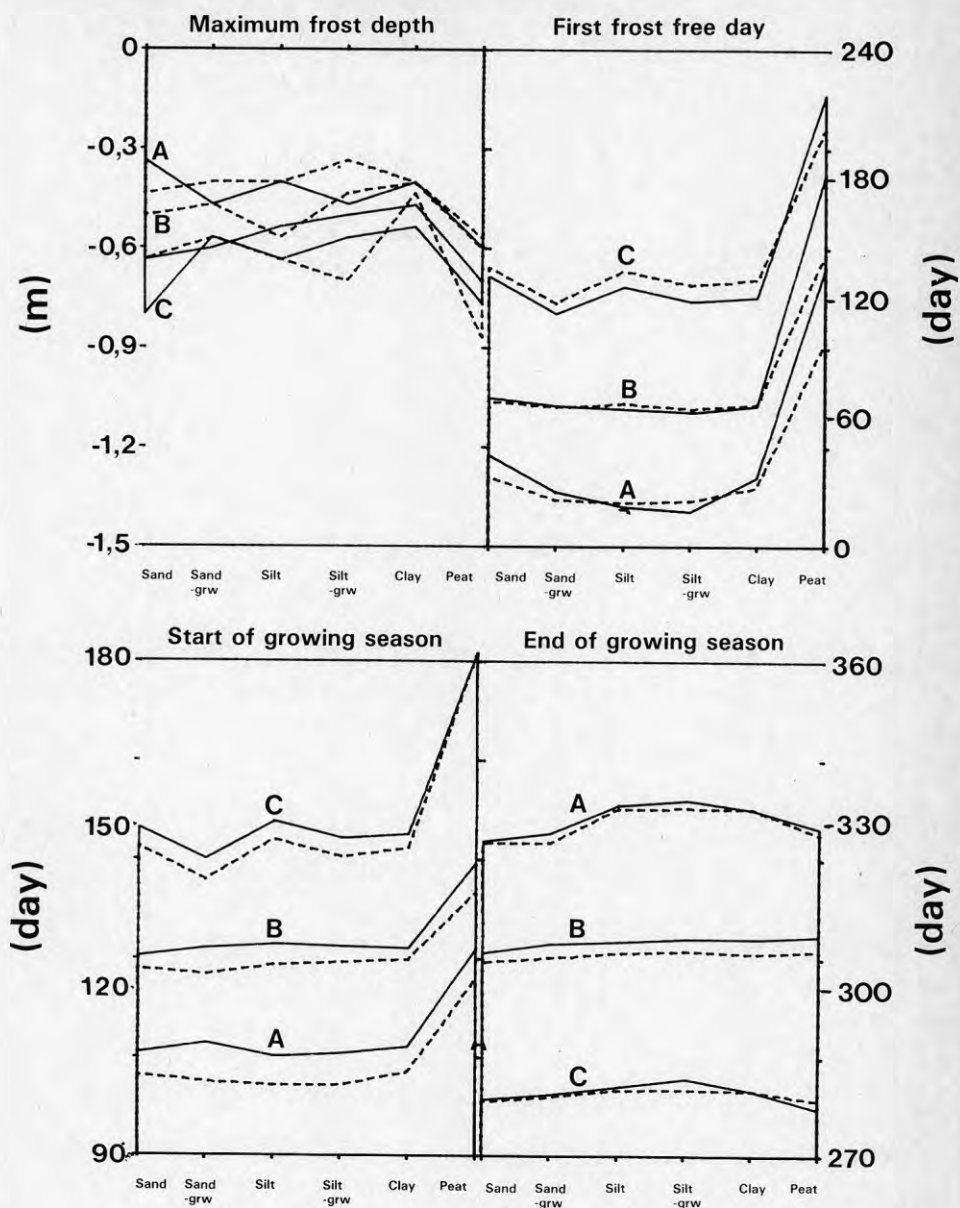
Skattade intercept för vegetationssäsongens början var i sitt variationsmönster mycket lika de för första tjälfria dag. En systematisk skillnad var dock att intercepten med fyra punkters skattning här alltid var mindre än sexpunktersanpassningen, medan de för första tjälfria dag som regel, och då speciellt för Kristianstad, var större än sexpunktersskattningen. Detta indikerade en minskad känslighet för förändringen av början på vegetationssäsongen vid stora värmeuttag som ej fanns för första tjälfria dag.

Till skillnad från intercepten för vegetationssäsongens början indikerade intercepten för vegetationssäsongens slut en ökad känslighet för värmeuttaget vid stora uttag. En annan stor skillnad var att torven här ej skiljde sig markant från mineraljordarna. Jordartsberoendet var relativt svagt för Luleå och Uppsala, där vegetationssäsongens slut utmärks av snabba klimatförändringar. I Kristianstad fanns dock en tydlig skillnad; sandprofilernas vegetationssäsonger avslutades några dagar före övriga mineraljordars.

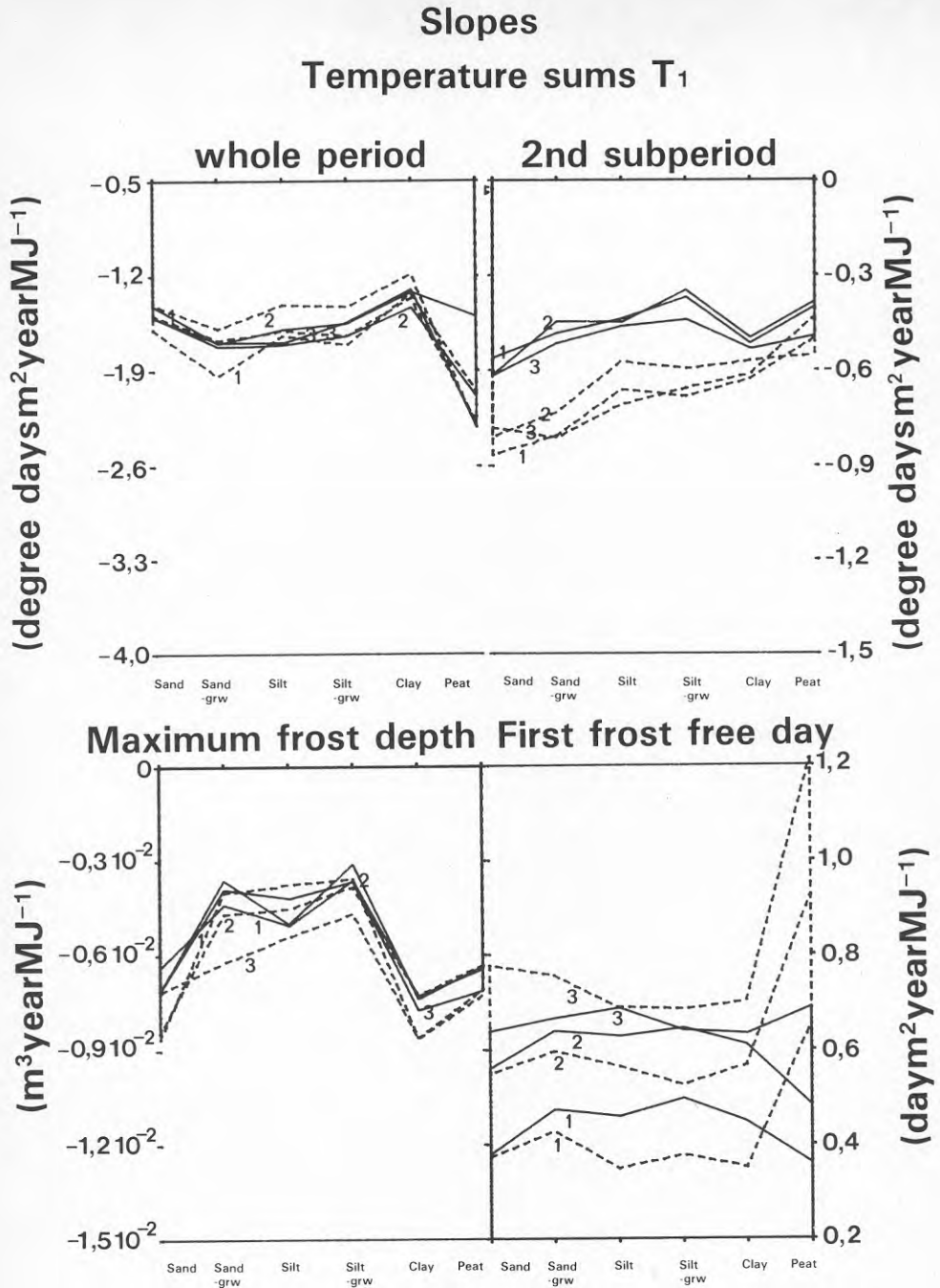


Figur 21. Skattade intercept (medelvärden av tre utvalda år, se Tabell 3) för temperatursummorna T_1 i Kristianstad (A), Uppsala (B) och Luleå (C) med årligt värmeuttag som oberoende variabel. Heldragen linje representerar skattningar gjorda med sex punkter medan streckad linje representerar skattningar gjorda med fyra punkter.

Intercept



Figur 22. Skattade intercept (medelvärden av tre utvalda år, se Tabell 3) för maximalt tjäldjup, första tjälfria dag, vegetationssäsongens början och slut i Kristianstad (A), Uppsala (B) och Luleå (C) med årligt värmeuttag som oberoende variabel. Helderagen linje representerar skattningar gjorda med sex punkter medan streckad linje representerar skattningar gjorda med fyra punkter.



Figur 23. Skattade lutningar (medelvärden av tre utvalda år, se Tabell 3) för temperatursummorna T_1 i Kristianstad (A), Uppsala (B) och Luleå (C) med årligt värmeuttag som oberoende variabel. Helledragen linje representerar skattningar gjorda med sex punkter medan streckad linje representerar skattningar gjorda med fyra punkter.

Skattade lutningar för temperatursummorna T_1 (Figur 23) och T_2 (Figur 24) och deras respektive delperioder skiljde sig markant åt vad gäller storlek, medan det allmänna variationsmönstret för jordar och orter var likartat. Notera att torven ej är medtagen i Figur 24 med de djupare skiktens temperatursummor, T_2 . Till skillnad från situationen för de skattade intercepten är här skillnaden mellan orterna betydligt mindre och många gånger av samma storleksordning som skillnaden mellan jordarna.

För hela periodens temperatursummor, T_1 och T_2 , konstaterades att skattade lutningar med sex punkters anpassning var brantast för Kristianstad (lägsta negativa värden) medan känsligheten avtog mot Luleå i norr. Vid fyrapunktensanpassningen blev situationen den omvända för siltprofilerna och för sanden med ytligt grundvatten. Här var alltså känsligheten, uttryckt i graddagar, för ett måttligt värmeuttag ($< 200 \text{ MJm}^{-2}\text{år}^{-1}$) störst i Luleå och minst i Kristianstad.

För den första och andra delperiodens temperatursummor T_1 och T_2 var skattade lutningar annars alltid mycket brantare för fyrapunktensanpassningarna jämfört med för anpassningarna för samtliga sex punkter. Detta indikerades av den tydliga plåtå som dessa samband uppvisade vid stora värmeuttag.

För den tredje och sista delperioden erhöles det motsatta förhållandet, med ökad känslighet vid stora värmeuttag, i Kristianstad och Uppsala. Detta var speciellt märkbart i silten med ytligt grundvatten och förklarades av den mycket höga värmekapaciteten i denna jord.

Känsligheten för en förändring av vegetationssäsongens början var störst i Kristianstad och avtog mot Luleå i norr. Lutningarna var genomgående störst vid fyrapunktensanpassningen vilket visade den utplanande effekten vid stora värmeuttag. Torvens extrema känslighet i förhållande till mineraljordarna var tydlig för samtliga orter.

Vegetationssäsongens slut var något okänsligare för ett värmeuttag än vegetationssäsongens början, speciellt vid måttliga värmeuttag. Känsligheten för en förändring var här densamma i Kristianstad och Luleå, medan den i Uppsala alltid var mindre. Ingen utplanande effekt vid stora värmeuttag märktes här, utan istället noterades, speciellt för Uppsala, den motsatta effekten. Torven skiljde sig ännu mer från övriga jordar än vad som var fallet för vegetationssäsongens början.

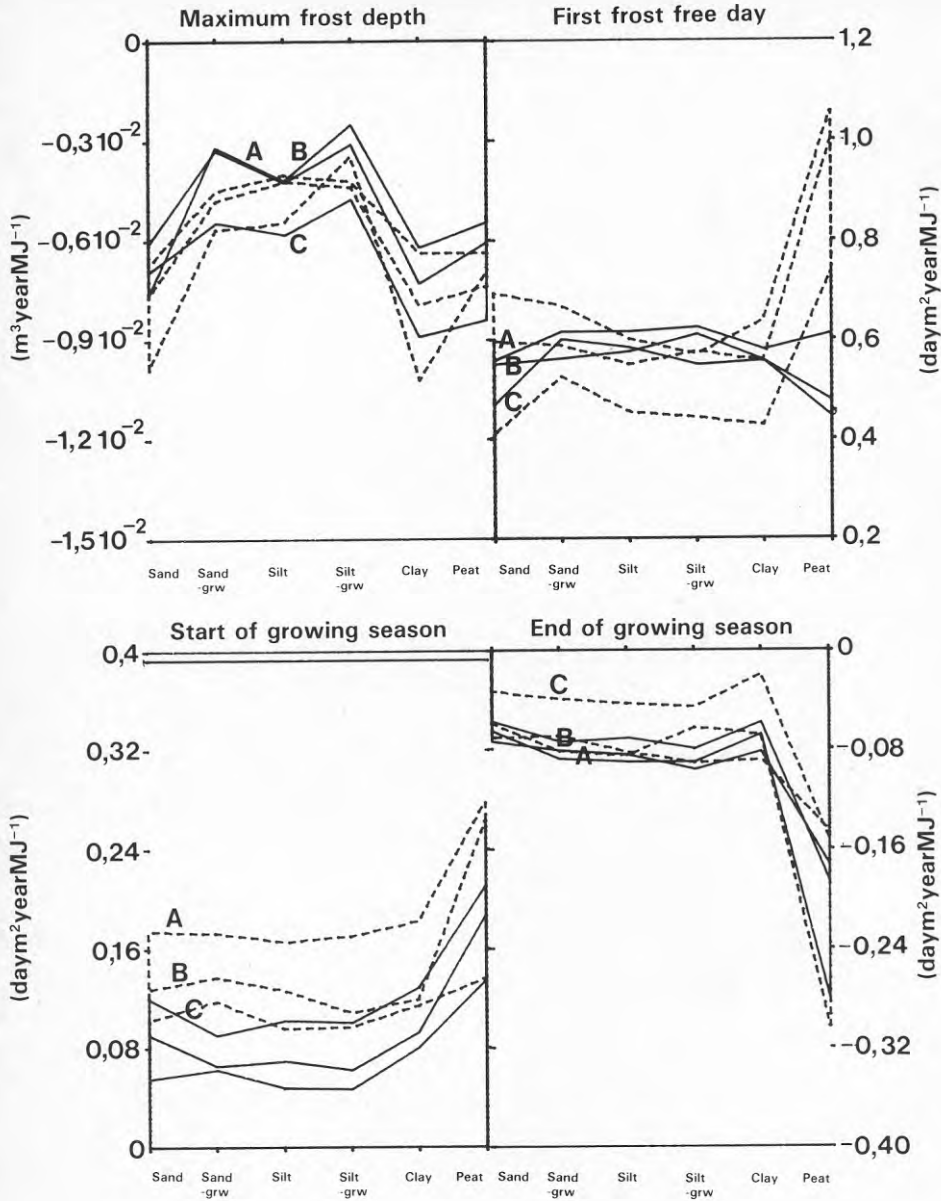
Skattade lutningar för maximalt tjäldjup visade stora skillnader mellan jordarna, men betydligt mindre skillnader mellan orterna. En viss ökad känslighet för tjäldjupet noterades i Luleå vilket kunde förklaras av det $2 \text{ }^\circ\text{C}$ kallare undre randvillkoret som där användes i modellen.

Känsligheten för en förändring av första tjälfria dag var störst i Kristianstad men skillnaderna mellan orterna måste betecknas som små. Torven utmärkte sig genom att här vara mycket känsligare än de övriga jordarna. Vid sexpunktensanpassning märktes dock ingen skillnad, men detta berodde på att permafrost tidigt utbildats.

Beroendet av det enskilda årets klimatförhållande framgår av Figur 26 där skattade lutningar är återgivna som medelvärde av de tre orterna för hela temperatursumman T_1 och dess delperioder, för maximalt tjäldjup och för första tjälfria dag.

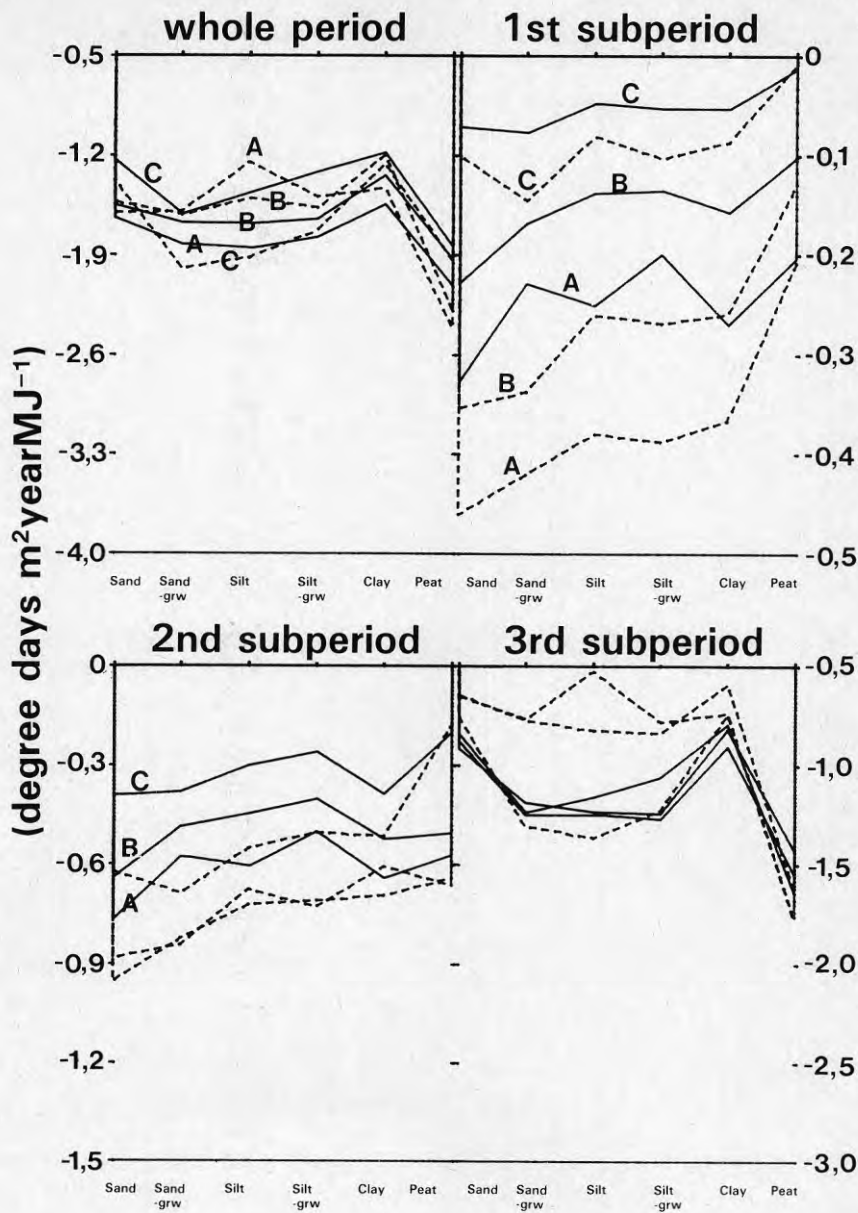
För temperatursumman T_1 i sin helhet, som uppvisade en liten variation mellan orterna, var också variationen mellan de utvalda åren liten. Medianåret erhöles en något mindre känslighet för värmeuttaget än de två ytterlighetsåren. Skillnaderna mellan åren blev något större vid fyrapunktens- än vid sexpunktensanpassning, men de var ändå små.

Slopes



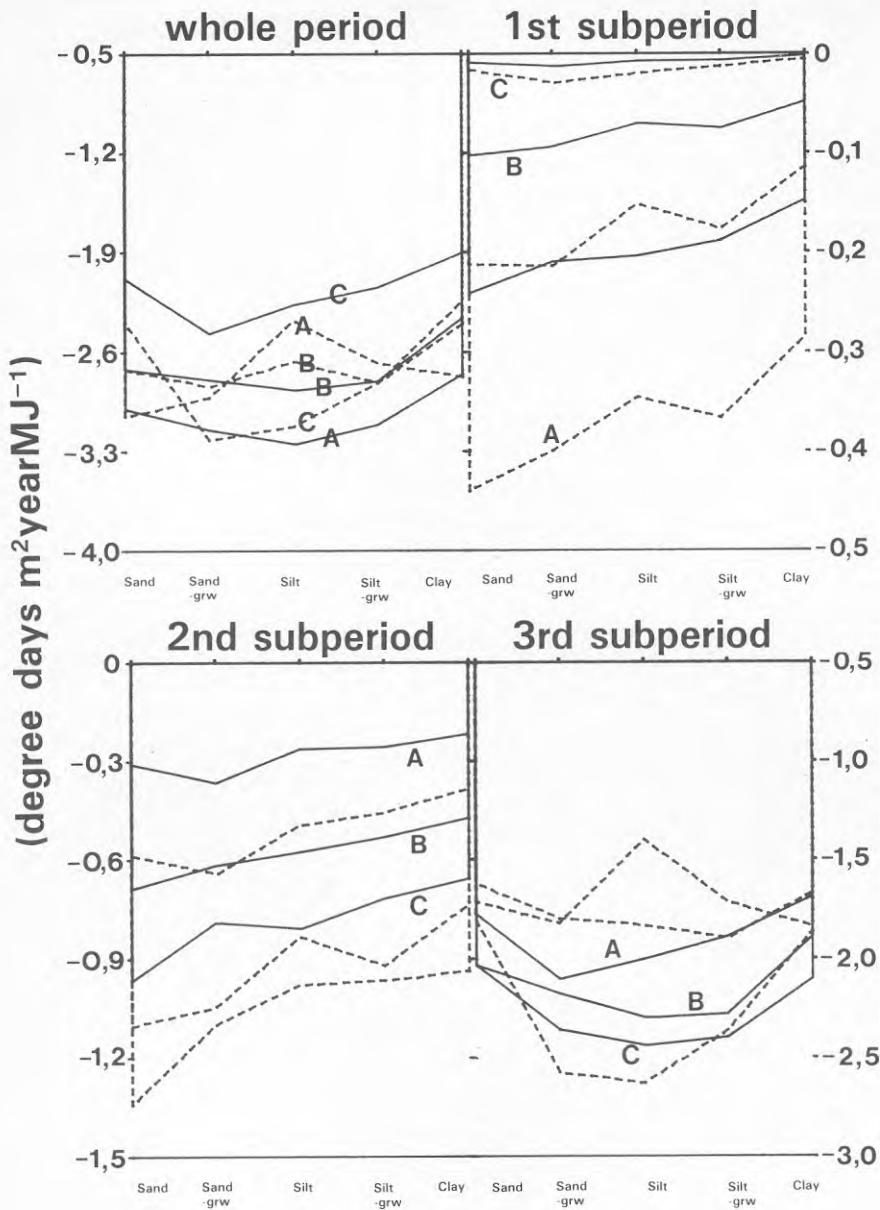
Figur 24. Skattade lutningar (medelvärden av tre utvalda år, se Tabell 3) för temperatursummorna T_2 i Kristianstad (A), Uppsala (B) och Luleå (C) med årligt värmeuttag som oberoende variabel. Heldragen linje representerar skattningar gjorda med sex punkter medan streckad linje representerar skattningar gjorda med fyra punkter.

Temperature sums T_1 slope



Figur 25. Skattade lutningar (medelvärden av tre utvalda år, se Tabell 3) för maximalt tjäldjup, första tjälfria dag, vegetationssäsongens början och slut i Kristianstad (A), Uppsala (B) och Luleå (C) med årligt värmeuttag som oberoende variabel. Heldragen linje representerar skattningar gjorda med sex punkter medan streckad linje representerar skattningar gjorda med fyra punkter.

Temperature sums T_2 slope



Figur 26. Skattade lutningar (medelvärden för de tre orterna) för temperatursumman T_1 under hela året och under dess andra delperiod, maximalt tjäldjup och första tjälfria dag under det kalla året (1), medianåret (2) och det varma året (3). Heldragen linje representerar skattningar gjorda med sex punkter medan streckad linje representerar skattningar gjorda med fyra punkter.

För andra delperioden, från start till den 1 juli, uppvisade temperatursumman T_1 också en måttlig variation mellan åren. Mönstret med en lägre känslighet för medianåret fanns även här, men till skillnad mot förhållandena för temperatursumman i sin helhet var det kalla året hela tiden känsligast för värmeuttaget.

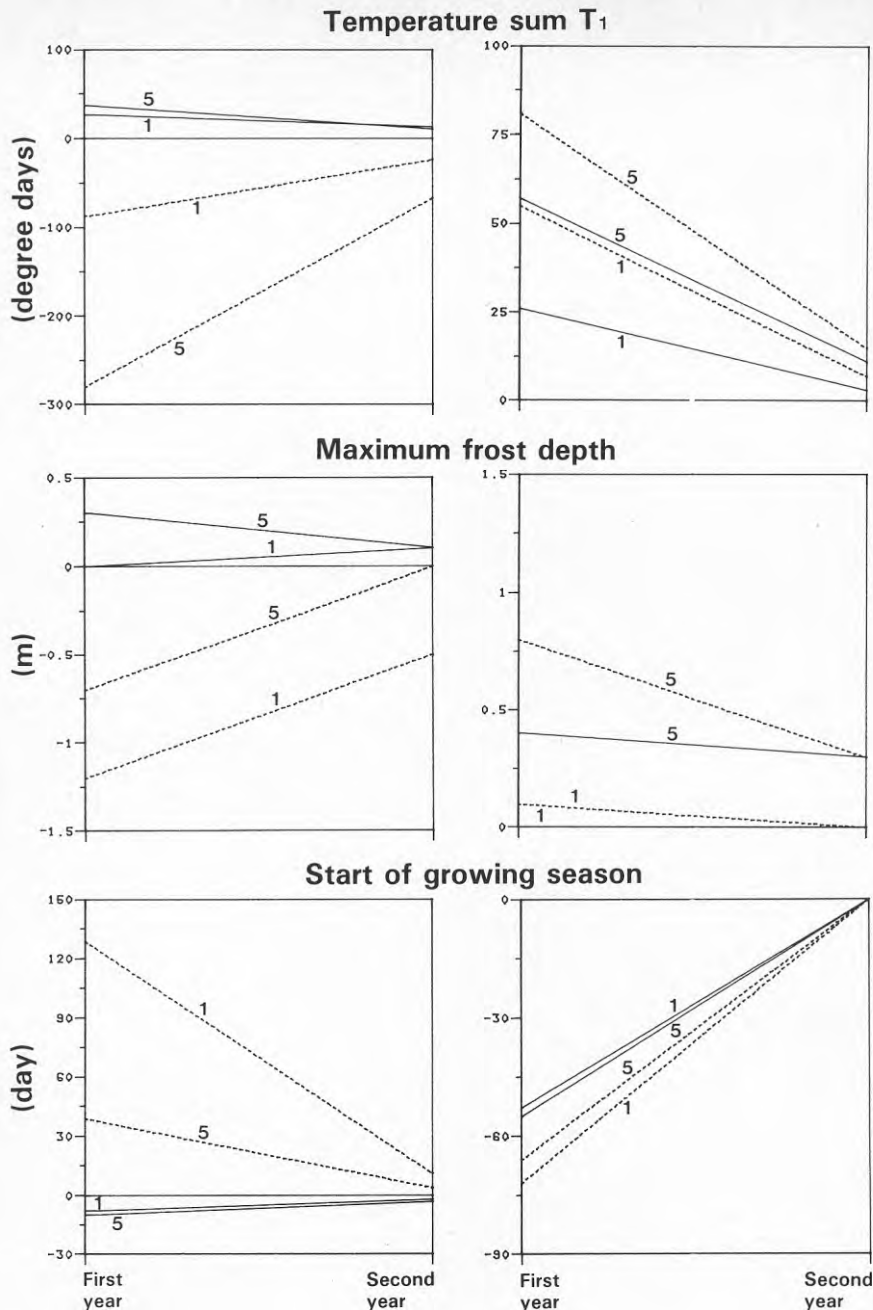
För maximalt tjäldjup och för första tjälfria dag var känsligheten störst för det varma året. Skillnaderna, både mellan år och mellan orter, var mycket små för det maximala tjäldjupet. För första tjälfria dag erhöles dock en större skillnad mellan åren än mellan orterna (Figur 25). Detta kan förklaras utgående från att samma stora variation i första tjälfria dag uppträder mellan åren i naturliga system.

Sammanfattningsvis kan konstateras att både det enskilda årets klimat och orten påverkar känsligheten för ett värmeuttag, men med tanke på de mycket stora skillnader som alltid förekommer mellan åren kan de skillnader i känslighet för ett värmeuttag som här erhållits, både mellan orterna och mellan åren, betecknas som små.

6.2 Inverkan av olika initialtillstånd för markklimatet

Markklimatets initialtillstånd beskrivs i modellen av temperaturförhållandena i markprofilen vid tidpunkten för simuleringens början. För att testa känsligheten för de temperaturförhållanden som föregår ett år då värmeuttag görs utnyttjades klimatdata från Uppsala. Effekten av ett normalt värmeuttag (ca $100 \text{ MJm}^{-2}\text{år}^{-1}$) på dels en tidigare opåverkad mark och dels en mark där uttaget tidigare var intensivt (ca $300 \text{ MJm}^{-2}\text{år}^{-1}$) simulerades (Figur 27, vänstra delen). Dessutom simulerades effekten av ett intensivt värmeuttag på dels en tidigare opåverkad mark och dels en mark med ett tidigare normalt värmeuttag (Figur 27, högra delen). Simuleringarna gjordes för både sand med högt grundvatten och för lera. Figuren återger effekten av initialtillståndet som skillnaden mellan de ovan beskrivna situationerna och den situation som skulle rått efter ett stort antal år med konstant uttagsnivå. Den kvardröjande effekten efter såväl första som andra året återges. Som framgår av figuren var differensen efter ett år relativt stor, men efter två år betydligt mindre.

Marktemperatursumman T_1 (Figur 27, övre delen) visade för en övergång från opåverkade förhållande till ett normalt värmeuttag liten påverkan både för sanden och leran. Övergången från ett intensivt till ett normalt värmeuttag gav dock en kraftigare effekt, speciellt för lerjorden. Den kraftiga effekten av initialtillståndet vid en övergång från intensivt till normalt värmeuttag förklarades av den stora förändringen i värmeuttag (ca $-200 \text{ MJm}^{-2}\text{år}^{-1}$). Detta kan jämföras med övergången från opåverkade förhållande till ett normalt uttag, som endast medförde halva förändringen (ca $+100 \text{ MJm}^{-2}\text{år}^{-1}$). Lerjorden visade sig här vara ett trögare system än sanden beroende på dess lägre värmeledningsförmåga och högre värmekapacitet. Efter två år var dock skillnaden mellan jordarna mindre. Inverkan av en övergång från opåverkade förhållande till ett intensivt värmeuttag var något kraftigare än vid motsvarande övergång till ett normalt värmeuttag, men redan andra året var skillnaderna obetydliga. Vid en jämförelse av övergången från ett intensivt uttag till ett normalt uttag med den omvända övergången visade det sig att påverkan av det gamla tillståndet kvarstod längre vid en minskning av värmeuttaget än vid motsvarande höjning. Skillnaden motsvarade en faktor fyra



Figur 27. Differenser mellan ett långvarigt värmeuttag och ett värmeuttag där uttagsnivån förändras för variablerna temperatursumman T_1 , maximalt tjäldjup och första tjälfria dag i Uppsala på sandjord med ytligt grundvatten (1) och lerjord (5). I vänstra delen av figuren avser heldragna linjer en övergång från opåverkade förhållande till ett normalt värmeuttag (ca $100 \text{ MJm}^{-2}\text{år}^{-1}$). Streckade linjer avser en övergång från ett intensivt värmeuttag (ca $300 \text{ MJm}^{-2}\text{år}^{-1}$) till ett normalt värmeuttag. I högra delen av figuren avser heldragna linjer en övergång från ett normalt uttag till ett intensivt medan streckade avser en övergång från opåverkade förhållande till ett intensivt värmeuttag.

för både leran och sanden. Detta kan förklaras genom att avkylningen av marken vid ett ökat värmeuttag är mycket effektivt via värmekollektorn, som ligger nere i marken. Uppvärmningen vid ett minskat värmeuttag måste dock alltid ske på naturlig väg via markytan.

Det maximala tjäldjupet (Figur 27, mellersta delen) uppvisade vid en övergång från opåverkat tillstånd till ett normalt uttag knappast någon kvardröjande effekt efter första året. En ny jämvikt inställde sig med andra ord redan första vintern. Vid en sänkning av värmeuttaget från en intensiv nivå till en normal nivå kom dock en kraftig kvardröjningseffekt att uppstå; i sandjorden kom tjäldjupet första vintern att ligga ca 1.2 m djupare än vid ett konstant normalt uttag, i lerjorden blev motsvarande fördjupning av tjälen ca 0.7 m. Jordartsberoendet var här omvänt jämfört med beroendet för marktemperatursumman. Värmeuttaget i sandjorden medförde en påverkan ned till ett större djup och fördelades således över en större jordvolym, vilket ledde till mindre påverkan på marktemperatursumman, men i gengäld kraftigare påverkan på det maximala tjäldjupet jämfört med lerjorden. Sandjordens goda vattentillgång (hög grundvattenyta) ledde till att stora energimängder krävdes för att värma upp de skikt där tjälfronten normalt låg. Lerjorden reagerade dock långsammare på en ökning av värmeuttaget; en ökning från opåverkat tillstånd till ett intensivt uttag gav en kvardröjande sänkning av maximala tjäldjupet med ca 0.8 m efter ett år. Sanden reagerade här snabbt och den nya tjälnivån inställde sig i stort sett redan första vintern. Det var tydligt att uppvärmningen av de djupa skikten i sandjorden gick relativt långsamt.

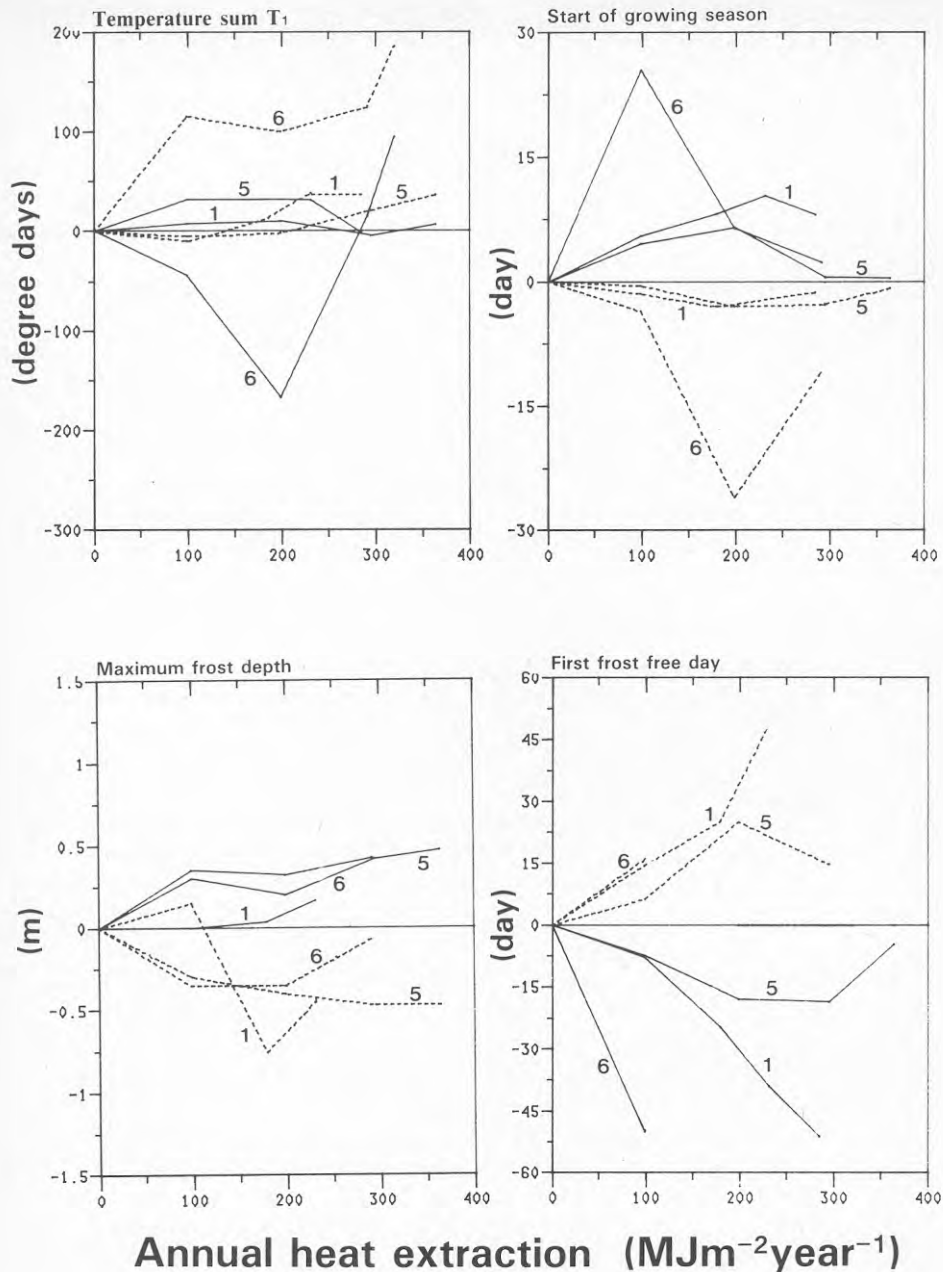
En kvardröjande försening av tjällossningen på ca fyra månader (Figur 27, nedre delen) noterades för sandjorden vid en sänkning av uttaget från en intensiv till en normal nivå. Andra året hade dock denna effekt reducerats till i stort sett noll. Lerjorden reagerade i enlighet med ovanstående inte fullt så kraftigt; förseningen blev här drygt en månad. Vid ett normalt uttag på en tidigare utnyttjad mark blev den förväntade tidigareläggningen av markens upptining obetydlig. När värmeuttaget ökades till en intensiv nivå tinade tjälen 2-2.5 månader tidigare det första året beroende på att marken ännu ej nedkylts fullständigt. Beroendet av jordart var svagt för det första året och kan ej bedömas för det andra året då permafrost bildades.

Generellt kan sägas att vid ett ökat energiuttag ställde markklimatet in sig relativt snabbt, speciellt gällde detta när ett normalt värmeuttag (ca $100 \text{ MJm}^{-2}\text{år}^{-1}$) gjordes på tidigare opåverkad mark. Sanden reagerade här som regel snabbare än leran. Vid en minskning av värmeuttaget sker inställningen avsevärt långsammare och sanden reagerade här kraftigare än lerjorden vad gäller tjäldjup och upptining medan effekten var den omvända för temperatursummans påverkan.

6.3 Inverkan av värmekollektorns förläggingsdjup

Marktemperatursumman T_1 påverkades under normalåret i Uppsala i ringa omfattning av uttagsdjupet, både vad gäller sandjorden med ytligt grundvatten och lerjorden (Figur 28, övre vänstra delen). För torvjorden däremot berodde marktemperatursumman kraftigt av uttagsdjupet. Vid ett normalt uttag, ca $100 \text{ MJm}^{-2}\text{år}^{-1}$, gav förläggingsdjupet 120 cm en drygt 100 graddagar högre marktemperatursumma än standarddjupet 80 cm. Differensen förblev sedan i stort sett konstant även vid större värmeuttag. I torven erhöles normalt permafrost i Uppsala vid ett värmeuttag av ca $100 \text{ MJm}^{-2}\text{år}^{-1}$.

Effects of depths of extraction



Figur 28. Differenser mellan olika förläggningsdjup av värmekollektorn för variablerna temperatursumman T_1 , vegetationssäsongens början, maximalt tjäldjup samt första tjälfria dag i Uppsala på sandjord med ytligt grundvatten (1), lerjord (5) och torvjord (6). Heldragna linjer hänför sig till förläggningsdjupet 60 cm och streckade linjer till djupet 120 cm. Differensen är beräknad mot ett förläggningsdjup av 80 cm.

Torvjordens extrema känslighet för permafrost visade sig genom att permafrost framkallades vid ett ytterligare något lägre uttag vid den djupa förläggningen, medan ett betydligt högre uttag kunde tillåtas på 60 cm:s förläggningsdjup. Lerjorden visade sig klara ett värmeuttag av drygt 300 MJm⁻²år⁻¹ utan att permafrost uppstod, i stort oberoende av uttagsdjupet. I sandjorden uppnåddes aldrig permafrost vid det ytliga förläggningsdjupet, medan det vid det normala uttagsdjupet blev permafrost vid ett uttag av knappt 300 MJm⁻²år⁻¹ och vid 120 cm:s förläggningsdjup vid ca 250 MJm⁻²år⁻¹. Förläggningsdjupets inverkan på permafrostkänsligheten visade sig alltså vara störst i torvjorden men framträdde även i sandjorden. Båda dessa profiler hade god markvattentillgång, vilket medför att kraftig tjälbildning kunde uppstå, och det krävdes därför en stor värmetillförsel under sommaren för att tina den bildade tjälen. I sandjorden underlättades denna värmetransport av den goda värmeledningsförmågan, men så var icke fallet i torvjorden.

Med torvjordens mycket låga värmeledningsförmåga var det ur marktemperatursynpunkt fördelaktigt att förlägga värmeuttaget så djupt som möjligt. Förläggningsdjupet 120 cm visade motsatt påverkan för torv jämfört med övriga jordarter vid låga värmeuttag. När permafrost inträdde i sanden och leran kom dock även dessas marktemperatursummer att gynnas av en djupare uttagsförläggning. En ytlig förläggning gav högre marktemperatursummer vid måttliga värmeuttag ur mineraljordarna på grund av den snabbare upptiningen av tjälen i dessa. För torven erhöles också här en motsatt effekt med mycket kallare ytskikt vid den ytliga förläggningen av värmekollektorerna. Denna effekt var dock starkt beroende av värmeuttagets storlek.

Vegetationssäsongen startade generellt senare ju ytligare värmeuttaget förlades (Figur 28, övre högra delen). Speciellt var detta märkbart i torvjorden där ett normalt värmeuttag på 60 cm:s djup gav en senareläggning av vegetationssäsongens början med en knapp månad jämfört med samma värmeuttag på 80 cm:s djup. För ett förläggningsdjup av 120 cm skedde en motsvarande tidigareläggning, men först vid ett värmeuttag av ca 200 MJm⁻²år⁻¹. Det var alltså tydligt att mot en viss värmeuttagsnivå i torvjorden svarade ett visst optimalt förläggningsdjup, så att ju större värmeuttaget var desto djupare borde värmekollektorerna ligga för att åstadkomma en så tidig start av vegetationssäsongen som möjligt. Ett dylikt förhållande kunde inte spåras i sanden eller leran; här var förläggningsdjupet relativt betydelselöst vad gäller inverkan på vegetationssäsongens början. En viss inverkan, ca en vecka, kunde dock noteras vid stora värmeuttag.

Det maximala tjäldjupet ökade generellt med ökat förläggningsdjup (Figur 28, nedre vänstra delen). (Notera att en negativ differens här indikerar ett ökat tjäldjup.) Torvjorden uppträdde här i stort i överensstämmelse med övriga jordar. Beroendet av värmeuttaget var relativt svagt; ett förläggningsdjup av 120 cm gav ca 0.3 m djupare tjäle och ett förläggningsdjup av 60 cm gav ca 0.3 m ytligare tjäle, oavsett värmeuttag. I sanden minskade tjäldjupet avsevärt vid mycket stora uttag vid ett ytligt värmeuttag. Detta berodde troligen på att modellen i denna situation beräknade en fiktiv värmetillförsel från markytan.

Tjällossningen försenades med ca två veckor vid den djupare förläggningen och tidigarelades med ungefär samma tidsrymd vid den ytliga förläggningen i sanden och leran (Figur 28, nedre högra delen). Avståndet från tjälkroppen till markytan, som ökar med ökande uttagsdjup var således avgörande. Torvmarken visade sig dock vara känsligare vad gäller den ytligare förläggningen. Denna gav en tidigareläggning av ca 50 dagar.

Generellt visade alltså torvjorden den största känsligheten för förläggingsdjupet av värmekollektorn. Valet av det bästa förläggingsdjupet blir dock komplicerat i torven eftersom den djupare förläggingsnivån, som medförde en tidigare vegetationssäsong och en varmare jord nära markytan, också medförde att risken för permafrost ökade.

6.4 Inverkan av värmeuttagets fördelning i tiden

Normalt är värmeuttaget beroende av utomhustemperaturen, men ett värmeuttag som är konstant i tiden har också simulerats. Detta ger ett jämnare markklimat, jämfört med det temperaturberoende värmeuttaget, med lägre sommartemperaturer och högre vintertemperaturer.

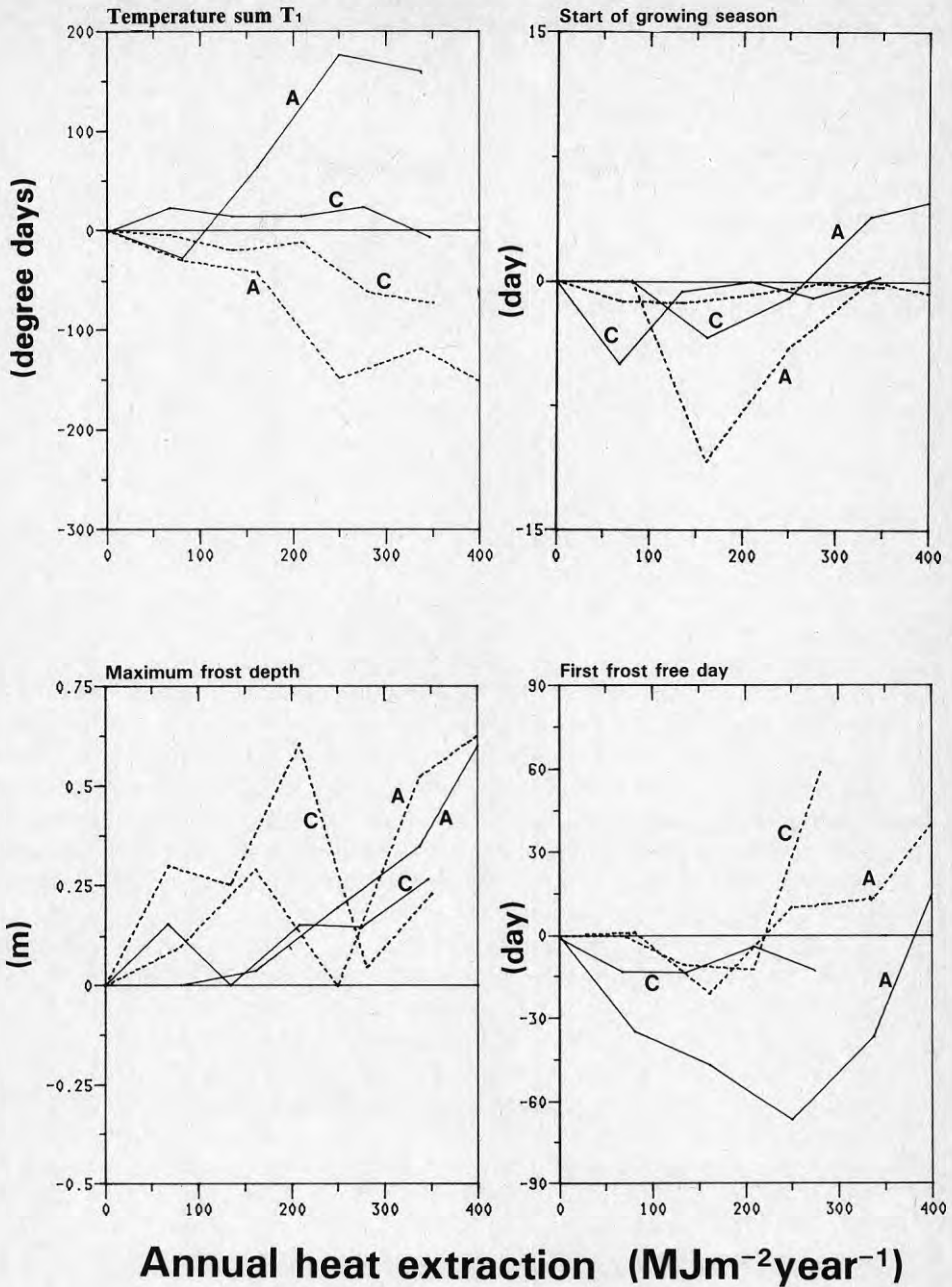
Marktemperatursumman T_1 (Figur 29, övre vänstra delen) var ca 25 graddagar lägre i leran vid ett konstant normalt värmeuttag i Kristianstad jämfört med ett temperaturberoende värmeuttag. I Luleå var skillnaden något lägre. I sandjorden med ytligt grundvatten blev det istället något varmare om värmeuttaget valdes konstant i tiden, speciellt vid höga värmeuttag i Kristianstad. Denna olikhet i reaktion på värmeuttagets fördelning antogs bero på att lerjorden var ett trögare system, där uttaget under vår och sommar ledde till ett kallare markklimat. I sandjorden, som har en högre värmeledningsförmåga och följaktligen ger en snabbare respons, medförde det låga vinteruttaget att upptining och uppvärmning under våren kunde gå snabbare och detta gav då ett varmare markklimat. Störst inverkan fick denna effekt i Kristianstad, med sitt relativt utjämnade klimat. Skillnaderna i temperatursumman ökade med ökat värmeuttag.

Det konstanta värmeuttaget medförde en tidigareläggning av vegetationssäsongens början (Figur 29, övre högra delen). I Kristianstad uppgick denna skillnad till maximalt ca 10 dagar jämfört med det temperaturberoende värmeuttaget. I Luleå blev skillnaden något lägre eller maximalt ca fem dagar. Effekten blev störst vid ett värmeuttag av ca $75 \text{ MJm}^{-2}\text{år}^{-1}$ i Luleå, medan den i Kristianstad blev störst först vid ca $150 \text{ MJm}^{-2}\text{år}^{-1}$. Vid stora värmeuttag blev fördelningen av uttaget av underordnat betydelse, vegetationssäsongens början bestämdes då till största delen av vårens ankomst, och vid små värmeuttag blev påverkan av själva uttaget relativt sett ringa. Ett uttalat maximum visade sig vid en viss uttagsnivå som bestämdes av det klimat som rådde på orten. Något jordartsberoende kunde inte spåras i denna variabel.

Det maximala tjäldjupet påverkades först vid stora värmeuttag i Kristianstad (Figur 29, undre vänstra delen). I Luleå blev det dock en minskning av ca 0.25 m, jämfört med ett temperaturberoende värmeuttag, redan vid ett normalt uttag. Skillnaderna ökade i stort sett med ökande värmeuttag. Ett visst jordartsberoende kunde spåras; lerjorden påverkades något mer än sandjorden av värmeuttagets fördelning. Detta tolkades så att maximala tjäldjupet i sandjorden styrdes mer av klimatet än av värmeuttagets fördelning. I lerjorden slog dock de klimatologiska förhållandena inte igenom lika kraftigt.

Första tjälfria dag vid ett konstant värmeuttag, jämfört med ett temperaturberoende uttag, påverkades kraftigast i Kristianstad (Figur 29, undre högra delen). Här skedde en tidigareläggning av upp till en månad vid ett normalt värmeuttag i sanden med ytligt grundvatten. I lerjorden blev effekten något mindre på grund av den lägre värmeledningsförmågan som gjorde att upptining och uppvärmning gick något långsammare här. I Luleå var skillnaderna relativt ringa,

Effects of temporal distribution of extraction



Figur 29. Differensen mellan ett konstant värmeuttag, oberoende av utomhustemperaturen, och motsvarande uttag styrt av varmvatten- och uppvärmningsbehovet för variablerna temperatursumman T_1 , vegetationssäsongens början, maximalt tjäldjup samt första tjälfria dag i Kristianstad (A) och Luleå (C) på sandjord med ytligt grundvatten (heldragna linjer) och lerjord (streckade linjer).

ca 14 dagar, både för sand- och lerjorden. Här var den mest avgörande faktorn återigen inte värmeuttagets fördelning utan klimatets naturliga växlingar.

Sammanfattningsvis kan sägas att av de redovisade variablerna visade marktemperatursumman T_1 ett klart jordartsberoende medan vegetationssäsongens början och maximala tjäldjupet visade sig bero mera av klimatologiska faktorer. Första tjälfria dag stod här i en mellanställning med ett visst jordartsberoende, men även ett markerat klimatberoende. Det var tydligt att värmeuttagets fördelning under året blev en allt viktigare faktor ju mindre klimatet varierade under året. Tidsfördelningen av värmeuttaget bör alltså vara viktigare att beakta i södra och mellersta Sverige än i norra Sverige.

6.5 Inverkan av snöröjning av marken

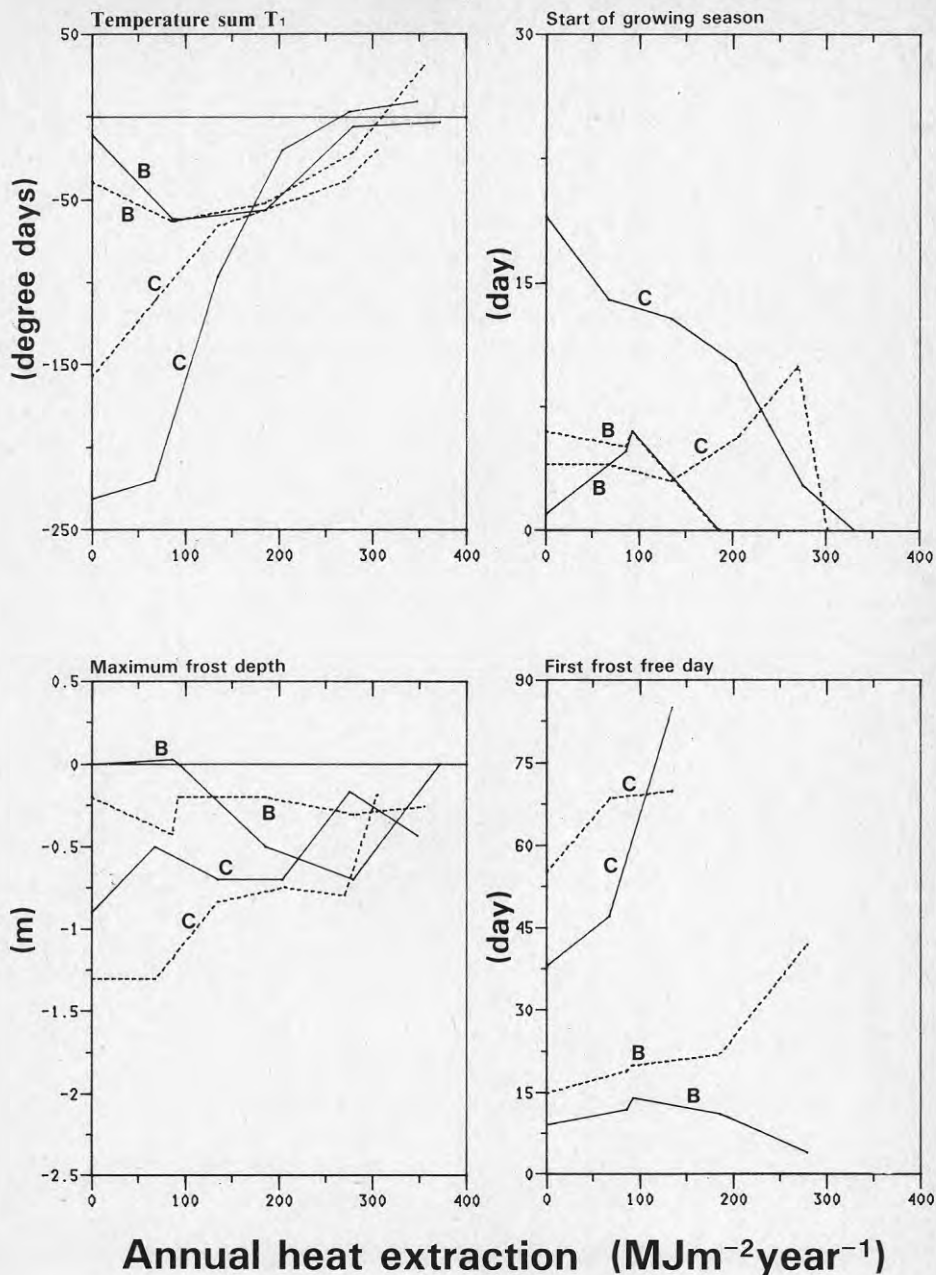
Snöröjning kan betraktas som ett värmeuttag som sker på en yttlig nivå och beror då av mängden snö som forslats bort från marken, dvs mängden förlorad isole-ring, och differensen mellan mark- och lufttemperatur. Följaktligen kommer effekten av snöröjningen att bli stor under en kall vinter med riklig snötillgång. Figur 30 visar skillnaden i påverkan vid ett värmeuttag från snöröjd mark jämfört med oröjda förhållanden.

Marktemperatursumman T_1 sänktes drastiskt under naturliga förhållande om marken snöröjdes (Figur 30, övre vänstra delen). På sandjorden under den stränga vintern medförde snöröjningen en sänkning av temperatursumman med ca 230 graddagar, eller hela 30 %. Lerjorden påverkades mindre på grund av att tjälén där var partiell och istället trängde djupare ner i profilen. Under den varmare vintern då tjälningen var försumbart liten, oberoende av om snötäcket undanröjts eller ej, var påverkan störst på lerjorden eftersom den har den lägsta värmeledningsförmågan och därigenom uppvärms långsammast. Om värme extraherades ur marken kom jordarts- och klimatberoendet att minska och snöröjningens påverkan blev allt mindre. Vid mycket kraftiga värmeuttag kunde till och med snöröjning ge positiva effekter på marktemperatursumman. Marktemperaturen hade då sänkts så mycket att en värmetransport från luften till marken upprätthölls under större delen av vintern.

Vegetationssäsongen försenades upp till 19 dagar på sandmarken under den kalla vintern (Figur 30, övre högra delen). Påverkan skedde i övrigt efter samma mönster som gällde för marktemperatursumman och var således lägre (ca 5 dagar) under den milda vintern. Denna nivå bibehölls i stort sett, med undantag för sandjorden under den kalla vintern, oberoende av värmeuttagets storlek. Att kurvorna i figuren fluktuerar mellan en påverkan av 0 och 10 dagar beror på definitionen av vegetationssäsongens början. Kravet på 10 dagars varaktighet av en marktemperatur högre än $+5\text{ }^\circ\text{C}$ gav också en osäkerhet i bestämningen av samma storlek.

Under den milda vintern påverkades tjäldjupet relativt obetydligt av snöröjningen, den kalla vintern var dock påverkan av storleksordningen en meter (Figur 30, nedre vänstra delen). Lerjorden uppvisade en större påverkan än sandjorden beroende på att denna sand var mycket fuktig under en meters djup, där hela markvattenförrådet fanns tillgängligt för frysning. I leran frös endast en del av vattnet vid en temperatur i närheten av $0\text{ }^\circ\text{C}$. Påverkan minskade generellt med ökat värmeuttag beroende på att energiförlusten på grund av snöröjningen blev mindre. Under den milda vintern var dock beroendet av värmeuttaget mycket litet. Som tidigare påpekats är tjäldjupet av modelltekniska skäl en diskret variabel varför enstaka punkter kan vara något missvisande.

Effects of snow cleared ground



Figur 30. Differensen mellan snöröjd mark och opåverkad mark för variablerna temperatursumman T_1 , vegetationssäsongens början, maximalt tjäldjup samt första tjäl fria dag i Uppsala (B) och Luleå (C) på sandjord med ytligt grundvatten (heldragna linjer) och lerjord (streckade linjer).

Tjällossningen senarelades med ca tre månader på lermarken under den kalla vintern (Figur 30, nedre högra delen). Tre månaders förskjutning innebar i det här fallet att tjälen gick första veckan i augusti. Senareläggningen under den varma vintern stannade vid ca två veckor. Effekten var mest markerad i lerjorden som med sin lägre värmeledningsförmåga får en långsam tjältining. Permafrost erhöles redan vid ett värmeuttag av ca $150 \text{ MJm}^{-2}\text{år}^{-1}$ under den kalla vintern om marken snöröjdes, oavsett om jordarten var lera eller sand. Vid snötäckt mark kunde ca 280 respektive 200 $\text{MJm}^{-2}\text{år}^{-1}$ tas ut utan att permafrost erhöles under den kalla vintern. Ett dubbelt så stort värmeuttag kunde göras under den varma vintern.

Sammanfattningsvis kan sägas att snöröjning av marken leder till i vissa avseende mycket stora konsekvenser. Effekterna minskade i regel vid högre värmeuttag, undantaget härifrån var tjällossningen; i detta avseende blev marken känsligare för snötäckets påverkan om ett värmeuttag gjordes.

7. Praktisk användning av resultaten vid dimensionering

7.1 Osäkerhetsfaktorer

Vid det praktiska utnyttjandet av här presenterade resultat kommer säkert många olika problem och brister i materialet att kunna uppdragas. Problemen är av flera slag, men man kan urskilja de viktigaste:

- 1) Osäkerhet i simulerade resultat
- 2) Representativiteten i simuleringarna jämfört med specifika objekt
- 3) Osäkerhet i dimensioneringskriterierna

Det måste understrykas att de här simulerade resultaten ej har kunnat testas mot några experimentella data, vilket givetvis är en svaghet. Modellen är endast provad för en lerjord i Mälardalen, dels på en opåverkad yta och dels på två ytor med olika värmeuttagsnivåer. Den jämförelse som då gjordes indikerade en mycket god överensstämmelse både för prediktion av temperaturen i en enskild behandling och för prediktion av effekter av ett uttag (Troedsson *et al.*, 1982). Det nu presenterade materialet grundar sig på typiska simuleringsobjekt, med typjordarter på ett fåtal utvalda orter, och kan således inte förväntas ha någon högre precision i det enskilda fallet. Däremot bör de allmänna tendenserna vara riktiga även om den exakta kvantifieringen ibland kan vara osäker. För de flesta praktiska dimensioneringar av ytjordvärmeanläggningar måste också ett stort mått av osäkerhet finnas eftersom man saknar resurser att göra några noggrannare bestämningar av vare sig markens egenskaper eller det specifika mikroklimatet.

Varje ytjordvärmeanläggning optimeras utifrån följande kriterier:

- Marktillgången
- Markanvändningen
- Ekonomiska realiteter

Beroende på hur hänsyn tas till dessa kriterier får olika faktorer större eller mindre betydelse vid dimensioneringen. Rangordningen och vikten för dessa dimensioneringskriterier måste naturligtvis vara helt klarlagda för att en optimal dimensionering ska vara möjlig och detta är många gånger svårt att uppnå då kriterierna är beroende av varandra. En strikt optimeringsanalys är således svår att genomföra. Ett exempel på en vanlig valsituation är huruvida en liten yta ska ut sättas för kraftig påverkan vid ett värmeuttag, med stora konsekvenser för markanvändningen och värmepumpens verkningsgrad, eller en större area ska utnyttjas, som därmed blir mindre intensivt påverkad.

7.2 Valet av variabler för dimensionering

Vid utnyttjande av det föreliggande materialet finns en stor frihet för användaren i valet av dimensioneringsvariabler för en bedömning av påverkan. Efter att de påverkande faktorerna har rangordnats kan relevanta dimensioneringsvariabler fastställas. Dessa kan sedan eventuellt viktas samman för att utgöra underlag till en optimal dimensionering.

I en fruktträdgård kan det exempelvis vara låga marktemperaturer under våren vid det dominerande rotdjupet som är utslagsgivande och då skall givetvis påverkan på den då aktuella marktemperatursumman beaktas. I ett annat fall kan kravet på att få en grönyta med gräs, utan att några krav på produktion och frodighet ställs, vara det viktigaste kriteriet. Då kan marktemperatursumman i ett ytligare markskikt användas för att kvantifiera effekten. I ett tredje fall är man endast intresserad av värmeutvinningen ur marken och kan försumma alla ekologiska konsekvenser. Värmepumpens krav på rimliga temperaturer på köldbärarvätskan är då ett viktigt dimensioneringskriterium. I det fallet är datum för tjälfri mark en intressant variabel eftersom den ger en god uppfattning om hur långt det är möjligt att utnyttja marken utan att besvärande permafrost utvecklas.

7.3 Begränsningar i materialet

En i vissa fall viktig dimensioneringsvariabel, nämligen tjälskjutningen av marken, är ej behandlad i denna rapport. I modellen har en tjälskjutning beräknats, som i extremfallet uppgick till ca 1 m (för silt med ytligt grundvatten vid ett värmeuttag av ca $350 \text{ MJm}^{-2}\text{år}^{-1}$), men denna är ej redovisad då stora osäkerheter fanns i prediktionerna. Modellen har aldrig testats mot experimentella tjälskjutningsdata. Tjälskjutningen behandlas dessutom speciellt av ett BFR-projekt (S. Fredén, VTJ) som är samordnat med andra projekt rörande dimensionering av ytjordvärmeanläggningar (se Kapitel 1.2).

Möjligheterna att variera ett ytjordvärmesystem är flera. Artificiell regenerering av marken, flera slangnivåer, olika slangdimensioner och olika horisontella avstånd mellan slangarna är några exempel på detta. Dessa aspekter har ej behandlats i rapporten utan kommer att tas upp senare i BFR:s speciella dimensioneringsprojekt.

Bland de här utvalda jordarna finns ingen som representerar ett mellanting mellan torvjorden och mineraljordarna. Här föreligger en brist på experimentellt material, främst vad gäller olika mulljordar, som representerar intermediära egen-skaper. I skogsmark kommer humuslagrets mäktighet att få en avgörande betydelse för en eventuell ytjordvärmeanläggning. Någon sådan profil har dock ej medtagits då en naturlig skogsmarkprofil bedömts som synnerligen ovanlig i ytjordvärmesammanhang eftersom nedläggningen av slangen medför att den naturliga uppbyggnaden av profilen ändras.

8. Sammanfattning

Målet med projektet har varit att genom simuleringar med en modell undersöka hur ett ytjordvärmeuttag påverkar markklimatet. Tillsammans med biologisk och teknisk kunskap skall de här presenterade resultaten förhoppningsvis kunna bidra till en bättre och mer nyanserad dimensionering av ytjordvärmeanläggningar.

Den använda modellen grundar sig på en numerisk lösning av de två partiella differentialekvationer som beskriver dynamiken för temperatur- och vattenförhållanden i mark. Modellen, som är endimensionell, har tidigare testats mot observerade markdata vid naturliga förhållanden, men också, i ett fall med en lerjord, mot förhållanden med olikstora värmeuttag. Dessa tester har visat att god överensstämmelse kan erhållas om markens termiska och hydrologiska egenskaper är kända eller möjliga att skatta.

För att kunna generalisera till jordar och klimatförhållanden i allmänhet har i detta sammanhang tre olika typår utvalts från tre orter i Sverige (Kristianstad, Uppsala och Luleå). Dessutom har sex olika markprofiler definierats för att återge vitt skilda markförhållanden. Under dessa betingelser har effekten av fem olikstora värmeuttag beräknats och jämförts med naturliga förhållanden. Simuleringarna har då standardmässigt förutsatt att värmeuttaget förläggs till 80 cm:s djup och fördelas i tiden beroende på uppvärmnings- och varmvattenbehovet för en enfamiljsfastighet. Eventuell snö som täcker marken får ligga orörd med naturlig täthet och avsmältning.

Markklimatet har uttryckts i ett antal mått som alla på något sätt återspeglar temperaturförhållanden, dvs hur temperaturen varierar med tid och djup i en markprofil. Här har definitioner av temperatursummor och vegetationssäsong från bioklimatologin varit vägledande.

Den största känsligheten för ett ytjordvärmeuttag erhöles för de tidiga delarna av vegetationssäsongen och då speciellt på djupa nivåer. Tidpunkten för första tjälfria dag var också mycket känslig för ett värmeuttag eftersom den återspeglar temperaturförhållanden på stora djup. Den minsta känsligheten erhöles för vegetationssäsongens slut som definierades som det datum då marktemperaturen på 30 cm djup varaktigt underskred $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

De olika markprofilerna påverkades många gånger på ett likartat sätt av värmeuttaget, men skillnader uppträdde och dessa var ibland olika beroende på ort och betraktad storhet för markklimatet. Torvprofilen intog här ofta en särställning jämfört med mineraljordarna. Den var vid naturliga förhållanden klart kallare än övriga jordar och detta förstärktes i regel vid ytjordvärmeuttag. Speciellt märkbart var detta för första tjälfria dag där en senareläggning på över tre månader inträffade även vid relativt små värmeuttag ($100\text{ MJm}^{-2}\text{år}^{-1}$) vid alla tre orterna. Detta innebar att permafrost skulle inträffa vid ett värmeuttag av 125, 200 respektive $250\text{ MJm}^{-2}\text{år}^{-1}$ i de tre orterna. Som exempel på ett annorlunda jordartsberoende kan nämnas temperatursumman för de översta 44 cm av marken under vegetationssäsongens början. Här blev torven allt mera lik de övriga mineraljordarna även om den hela tiden var den kallaste marken. Lerprofilens temperatursumma för hela vegetationssäsongen, liksom också vegetationssäsongens längd, påverkades minst av ett värmeuttag, men skillnaderna var ibland små jämfört med övriga mineraljordar. Att jordartsberoendet blev så litet i simuleringarna berodde dels på att de grovkornigare jordarna normalt har en högre värmeledningsförmåga

och att de speciellt i samband med extra tjälbildning vid ytjordvärmeuttag får en många gånger kraftigt förhöjd vattenhalt vilket ökar värmekapaciteten till nivåer som liknar finkornigare material.

Förändringar i markklimat vid ytjordvärmeuttag har tidigare bildligt uttryckts som förflyttningar av marken till nordligare breddgrader. Föreliggande resultat visar att den skenbara förflyttningen som kan åstadkommas i hög grad är beroende av betraktad storhet. Den största effekten visade sig i de djupare markskiktens temperatursumma, på 44-140 cm:s djup, fram till den 1 juni. Där erhöles i sanden med djupt grundvatten en situation i Uppsala och Kristianstad vid värmeuttag av 100 respektive 150 $\text{MJm}^{-2}\text{år}^{-1}$ som motsvarade naturliga förhållanden i Luleå. För hela vegetationssäsongens temperatursumma åstadkomms motsvarande förflyttningar till Luleå vid värmeuttag av 160 respektive 230 $\text{MJm}^{-2}\text{år}^{-1}$. Om istället de ytligare skiktens temperatursumma betraktades behövdes ett värmeuttag av 260 respektive 450 $\text{MJm}^{-2}\text{år}^{-1}$. För att ändra vegetationssäsongens början behövdes 130 respektive 250 $\text{MJm}^{-2}\text{år}^{-1}$ medan det för vegetationssäsongens längd krävdes hela 300 respektive 450 $\text{MJm}^{-2}\text{år}^{-1}$. Första tjälfria dag ändrades till Luleåförhållanden vid ett värmeuttag av endast 90 respektive 130 $\text{MJm}^{-2}\text{år}^{-1}$ för Uppsala och Kristianstad. Motsvarande förflyttningar inträffade vid ungefär samma värmeuttag för alla mineraljordar, men torvprofilen skiljde sig drastiskt genom att de skenbara förflyttningarna där inträffade vid betydligt mindre värmeuttag.

Förläggningsdjupet för markkollektorn var mest kritiskt i torven. En djupare förläggning innebar en tidigareläggning av vegetationssäsongens början och ett varmare ytligt skikt, men också en ökad risk för permafrost eftersom tjälen lokaliserades till djupare nivåer.

Värmeuttagets fördelning i tiden var viktigare i södra än i norra Sverige. Marktemperaturen blev som regel kallare under sommaren om uttaget valdes som konstant i tiden. Vegetationssäsongens början tidigarelades och tjälen blev något ytligare. Första tjälfria dag inträffade också något tidigare vilket innebar att något mer energi kunde extraheras ur marken utan att permafrost uppstod om värmeuttaget valdes som konstant i tiden.

Snötäcket var mycket viktigt för effekten av ytjordvärmeuttaget, speciellt under en kall vinter med rikligt med snö. För Luleå kunde kompaktering eller bortforslande av ett mäktigt snötäcke från en sandjord motsvara effekten av ett ytjordvärmeuttag av ca 200 $\text{MJm}^{-2}\text{år}^{-1}$ under en sträng vinter med mycket snö. Effekten blev något mindre i en lerjord på grund av dess lägre värmeledningsförmåga. Efter samma stränga vinter i Luleå erhöles permafrost vid ca 150 $\text{MJm}^{-2}\text{år}^{-1}$ i både lera och sand om snön bortforslades, medan nästan det dubbla värmeuttaget kunde tillåtas utan permafrost om snön lämnades orörd.

Markens tröghet vid en omställning från naturliga förhållanden till en situation med värmeuttag eller vice versa undersöktes också. Vid ett ökat energiuttag anpassade sig marken till största delen till den nya situationen under första året, speciellt i sand. En motsvarande anpassning mot lägre energiuttag från ett tidigare intensivt uttag gick långsammare och det tidigare uttaget återspeglades i sommarens marktemperaturer även efter två år.

Slutligen bör det påpekas att alla de här presenterade resultaten grundar sig på teoretiska beräkningar och att stora avvikelser givetvis kan bli följden om resultaten jämförs med observationer i enskilda fall. De allmänna trenderna och den variationsbredd som finns i materialet torde dock kunna vara en god vägledning för att bedömma hur stora effekter som kan fås vid olika nyttjandenivåer av yttjordvärme.

9. Litteraturförteckning

- Ahlkrona, D. 1983. Fem års fälterfarenhet. Mark och markvärmekollektorer. I: Mogensen, P. (red.). Ytjordvärme - markkollektorer. Byggeforskningsrådet, R37:1983. Stockholm. Sid. 15-23.
- Andersson, S. & Wiklert, P. 1972. Markfysikaliska undersökningar i odlad jord. Grundförbättring 25 (2-3). Uppsala. Sid. 53-143.
- Beskow, G. 1932. Tjälbildning och tjällyftning med särskild hänsyn till vägar och järnvägar. Sveriges Geologiska Undersökning, serie C, No 375, Årsbok 26 (3). Stockholm. 242 s.
- Halldin, S. 1980. SOIL water and heat model. I. Synthesis of physical processes. Acta Universitatis Upsaliensis. Abstract of Uppsala Dissertations from the Faculty of Science, 567. Uppsala. 28 s.
- Halldin, S., Jansson, P.-E. & Lundkvist, H. 1979. Ecological effects of longterm soil heat pump use. Proc. Nordic Symp. Earth Heat Pump Systems, Suppl., Chalmers tekniska högskola. Göteborg. Sid. 14-23.
- Jansson, P.-E. 1980. SOIL water and heat model. II. Field studies and applications. Acta Universitatis Upsaliensis. Abstract of Uppsala Dissertations from the Faculty of Science, 568. Uppsala. 26 s.
- Jansson, P.-E. & Halldin, S. 1979. Model for the annual water and energy flow in a layered soil. I: Halldin, S. (red.). Comparison of Forest and Energy Exchange Models. Society for Ecological Modelling, Köpenhamn. Sid. 145-163.
- Jansson, P.-E. & Halldin, S. 1980. SOIL water and heat model. Technical description. Swedish Coniferous Forest Project. Tech. Rep. 26. Uppsala. 81 s.
- Jansson, P.-E. & Lundin, L.-C. 1983. The significance of soil texture, hydrology and climate when selecting an optimal heat extraction rate. I: Proc. Int. Conf. on Subsurface Heat Storage in Theory and Practice, App., Part II. Stockholm. Sid. 638-643.
- Johansson, Ø. 1980. Thermal conductivity of soils. Symp. on Frost Action on Roads, Report 1, OECD. Paris. Sid. 165-188.
- Kersten, M. S. 1949. Thermal properties of soils. Inst. of Technology, Engineering Exp. Station. Bull. No 28. Minneapolis.
- Mogensen, P. 1983. Ytjordvärme — markkollektorer. Byggeforskningsrådet, R37:1983. Stockholm. 177 s.
- Mualem, Y. 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water Resour. Res. 12:513-522.
- Odin, H., Eriksson, B. & Perttu, K. 1983. Temperaturklimatkartor för svenskt skogsbruk. Rapporter i skogsekologi och skoglig marklära. Lantbruksuniversitetet. Uppsala.
- Puustjarvi, V. & Robertson, R. A. 1975. Peat in Horticulture. I: Robinson, D. W. and Lamb, J. O. D. (red.). AP applied botany series vol. 3. Sid. 30-33.
- Troedsson, T., Jansson, P.-E., Lundkvist, H., Lundin, L. & Svensson, R. 1982. Ekologiska effekter av ytjordvärmeuttag. Markkemi, markfysik, markbiologi, markhydrologi och växtodling. Byggeforskningsrådet. Stockholm. 76 s.
- de Vries, D. A. 1975. Heat transfer in soils. I: de Vries, D. A. & Afgan, N. H. (red.). Heat and Mass Transfer in the Biosphere. I. Transfer Processes in Plant Environment. Washington D. C. Sid. 5-28.

APPENDIX

Intercept och lutningar till linjära regressioner med olika mått på markklimatet som beroende variabler och det årliga värmeuttaget som oberoende variabel

Tabell 1. Temperatursumman T_1 (0–44 cm djup).

Jord	Ort	Intercept (graddagar)				Lutningar (graddagarm ² ärMJ ⁻¹)				r ²	n
		kallt	median	varmt	medel	kallt	median	varmt	medel		
Sand	Kri	1593	1393	1530	1505	-1.63	-1.79	-1.50	-1.64	0.991	6
Sand	Upp	1297	1143	1357	1266	-1.49	-1.55	-1.60	-1.55	0.974	6
Sand	Lul	858	811	916	862	-1.13	-1.15	-1.41	-1.23	0.969	6
Sand	Medel	1249	1116	1267	1211	-1.42	-1.50	-1.50	-1.47	0.978	6
Sand-grw	Kri	1586	1380	1538	1501	-2.05	-1.83	-1.60	-1.82	0.976	6
Sand-grw	Upp	1271	1134	1336	1247	-1.62	-1.64	-1.74	-1.67	0.976	6
Sand-grw	Lul	874	828	932	878	-1.40	-1.69	-1.73	-1.61	0.926	6
Sand-grw	Medel	1244	1114	1269	1209	-1.69	-1.72	-1.69	-1.70	0.959	6
Silt	Kri	1635	1448	1530	1537	-1.87	-1.96	-1.72	-1.85	0.929	6
Silt	Upp	1250	1128	1339	1239	-1.58	-1.71	-1.73	-1.67	0.951	6
Silt	Lul	838	769	875	827	-1.32	-1.43	-1.61	-1.45	0.931	6
Silt	Medel	1241	1115	1248	1201	-1.59	-1.70	-1.69	-1.66	0.937	6
Silt-grw	Kri	1569	1401	1520	1497	-1.85	-1.88	-1.57	-1.77	0.975	6
Silt-grw	Upp	1244	1108	1321	1225	-1.57	-1.59	-1.77	-1.64	0.954	6
Silt-grw	Lul	837	770	886	831	-1.23	-1.44	-1.25	-1.31	0.877	6
Silt-grw	Medel	1217	1093	1242	1184	-1.55	-1.64	-1.53	-1.57	0.935	6
Lera	Kri	1545	1380	1506	1477	-1.55	-1.68	-1.38	-1.54	0.992	6
Lera	Upp	1242	1107	1307	1219	-1.31	-1.38	-1.31	-1.33	0.979	6
Lera	Lul	862	800	862	841	-1.09	-1.24	-1.19	-1.18	0.975	6
Lera	Medel	1216	1096	1225	1179	-1.32	-1.43	-1.29	-1.35	0.982	6
Torv	Kri	1274	1210	1398	1294	-1.66	-2.04	-2.65	-2.12	0.951	6
Torv	Upp	1004	973	1236	1071	-1.41	-2.18	-2.20	-1.93	0.911	6
Torv	Lul	509	631	750	630	-1.41	-2.05	-2.06	-1.84	0.945	6
Torv	Medel	929	938	1128	998	-1.49	-2.09	-2.31	-1.96	0.936	6
Sand	Kri	1597	1381	1530	1503	-1.68	-1.64	-1.48	-1.60	0.985	4
Sand	Upp	1322	1145	1335	1267	-1.86	-1.53	-1.17	-1.52	0.969	4
Sand	Lul	870	822	926	873	-1.24	-1.29	-1.58	-1.37	0.982	4
Sand	Medel	1263	1116	1264	1214	-1.59	-1.49	-1.41	-1.50	0.979	4
Sand-grw	Kri	1597	1342	1507	1482	-2.16	-1.38	-1.22	-1.59	0.969	4
Sand-grw	Upp	1314	1120	1308	1247	-2.15	-1.40	-1.28	-1.61	0.985	4
Sand-grw	Lul	883	867	968	906	-1.49	-2.23	-2.24	-1.99	0.923	4
Sand-grw	Medel	1265	1110	1261	1212	-1.93	-1.67	-1.58	-1.73	0.959	4
Silt	Kri	1579	1382	1500	1487	-1.22	-1.16	-1.34	-1.24	0.806	4
Silt	Upp	1295	1123	1280	1233	-2.15	-1.61	-0.72	-1.49	0.960	4
Silt	Lul	857	811	913	860	-1.53	-2.03	-2.17	-1.91	0.970	4
Silt	Medel	1244	1105	1231	1193	-1.64	-1.60	-1.41	-1.55	0.912	4
Silt-grw	Kri	1575	1352	1500	1475	-1.87	-1.28	-1.31	-1.49	0.964	4
Silt-grw	Upp	1287	1108	1285	1227	-2.05	-1.49	-1.15	-1.56	0.982	4
Silt-grw	Lul	838	820	921	860	-1.20	-2.15	-1.82	-1.72	0.897	4
Silt-grw	Medel	1234	1093	1235	1187	-1.71	-1.64	-1.42	-1.59	0.947	4
Lera	Kri	1529	1376	1496	1467	-1.36	-1.63	-1.28	-1.43	0.987	4
Lera	Upp	1254	1092	1287	1211	-1.45	-1.10	-1.03	-1.19	0.994	4
Lera	Lul	868	808	867	848	-1.17	-1.35	-1.24	-1.25	0.946	4
Lera	Medel	1217	1092	1217	1175	-1.33	-1.36	-1.18	-1.29	0.976	4
Torv	Kri	1317	1237	1410	1321	-2.18	-2.29	-2.75	-2.41	0.977	4
Torv	Upp	1071	959	1258	1096	-2.23	-2.06	-2.56	-2.28	0.895	4
Torv	Lul	527	656	726	636	-1.72	-2.47	-1.61	-1.93	0.938	4
Torv	Medel	972	951	1131	1018	-2.04	-2.27	-2.31	-2.21	0.937	4

Tabell 2. Temperatursumman T₂ (44-140 cm djup).

Jord	Ort	Intercept (graddagar)				Lutningar (graddagarm ² ärMJ ⁻¹)				r ²	n
		kalld	median	varmt	medel	kalld	median	varmt	medel		
Sand	Kri	1428	1268	1360	1352	-3.07	-3.12	-2.81	-3.00	0.993	6
Sand	Upp	1073	985	1183	1080	-2.58	-2.63	-2.95	-2.72	0.980	6
Sand	Lul	661	608	704	658	-1.93	-1.92	-2.39	-2.08	0.968	6
Sand	Medel	1054	954	1082	1030	-2.53	-2.56	-2.72	-2.60	0.981	6
Sand-grw	Kri	1379	1221	1367	1322	-3.51	-3.04	-2.91	-3.15	0.975	6
Sand-grw	Upp	1008	949	1140	1032	-2.64	-2.63	-3.10	-2.79	0.975	6
Sand-grw	Lul	668	601	726	665	-2.17	-2.33	-2.90	-2.47	0.918	6
Sand-grw	Medel	1018	923	1078	1006	-2.77	-2.67	-2.97	-2.80	0.956	6
Silt	Kri	1502	1259	1391	1384	-3.38	-3.11	-3.25	-3.25	0.962	6
Silt	Upp	1023	956	1167	1049	-2.76	-2.70	-3.15	-2.87	0.955	6
Silt	Lul	629	550	651	610	-2.08	-2.08	-2.63	-2.26	0.914	6
Silt	Medel	1051	922	1070	1014	-2.74	-2.63	-3.01	-2.79	0.944	6
Silt-grw	Kri	1387	1242	1360	1330	-3.36	-3.07	-2.91	-3.11	0.971	6
Silt-grw	Upp	993	934	1123	1017	-2.59	-2.69	-3.14	-2.80	0.954	6
Silt-grw	Lul	629	553	676	620	-1.98	-2.17	-2.27	-2.14	0.892	6
Silt-grw	Medel	1003	910	1053	989	-2.65	-2.64	-2.77	-2.69	0.939	6
Lera	Kri	1291	1166	1296	1251	-2.77	-2.80	-2.69	-2.76	0.992	6
Lera	Upp	943	883	1068	965	-2.26	-2.30	-2.52	-2.36	0.981	6
Lera	Lul	643	539	586	590	-1.90	-1.82	-1.99	-1.90	0.956	6
Lera	Medel	959	863	983	935	-2.31	-2.31	-2.40	-2.34	0.976	6
Torv	Kri	1274	1210	1398	1294	-1.66	-2.04	-2.65	-2.12	0.951	6
Torv	Upp	1004	973	1236	1071	-1.41	-2.18	-2.20	-1.93	0.911	6
Torv	Lul	509	631	750	630	-1.41	-2.05	-2.06	-1.84	0.945	6
Torv	Medel	929	938	1128	998	-1.49	-2.09	-2.31	-1.96	0.936	6
Sand	Kri	1448	1265	1359	1357	-3.32	-3.08	-2.76	-3.05	0.993	4
Sand	Upp	1109	1001	1149	1086	-3.07	-2.80	-2.29	-2.72	0.982	4
Sand	Lul	688	635	719	681	-2.23	-2.29	-2.63	-2.38	0.988	4
Sand	Medel	1082	967	1076	1041	-2.87	-2.72	-2.56	-2.72	0.988	4
Sand-grw	Kri	1430	1174	1314	1306	-3.98	-2.48	-2.29	-2.92	0.981	4
Sand-grw	Upp	1085	947	1097	1043	-3.59	-2.54	-2.39	-2.84	0.989	4
Sand-grw	Lul	705	667	790	720	-2.58	-3.25	-3.82	-3.22	0.942	4
Sand-grw	Medel	1073	929	1067	1023	-3.38	-2.76	-2.83	-2.99	0.971	4
Silt	Kri	1412	1194	1329	1312	-2.32	-2.31	-2.50	-2.38	0.962	4
Silt	Upp	1099	968	1071	1046	-3.72	-2.81	-1.46	-2.66	0.954	4
Silt	Lul	678	618	720	672	-2.66	-3.05	-3.65	-3.12	0.969	4
Silt	Medel	1063	927	1040	1010	-2.90	-2.72	-2.54	-2.72	0.962	4
Silt-grw	Kri	1410	1165	1321	1299	-3.51	-2.11	-2.43	-2.68	0.972	4
Silt-grw	Upp	1080	942	1068	1030	-3.62	-2.67	-2.16	-2.82	0.985	4
Silt-grw	Lul	643	622	734	666	-2.09	-3.14	-3.22	-2.82	0.912	4
Silt-grw	Medel	1045	910	1041	998	-3.07	-2.64	-2.60	-2.77	0.957	4
Lera	Kri	1296	1177	1291	1255	-2.76	-2.90	-2.66	-2.77	0.993	4
Lera	Upp	987	880	1048	972	-2.80	-2.16	-2.24	-2.40	0.998	4
Lera	Lul	675	569	606	617	-2.27	-2.21	-2.25	-2.24	0.950	4
Lera	Medel	986	875	982	948	-2.61	-2.42	-2.38	-2.47	0.980	4
Torv	Kri	1317	1237	1410	1321	-2.18	-2.29	-2.75	-2.41	0.977	4
Torv	Upp	1071	959	1258	1096	-2.23	-2.06	-2.56	-2.28	0.895	4
Torv	Lul	527	656	726	636	-1.72	-2.47	-1.61	-1.93	0.938	4
Torv	Medel	972	951	1131	1018	-2.04	-2.27	-2.31	-2.21	0.937	4

Tabell 3. Temperatursumman $T_{1-1, 0-44}$ cm djup, start - 1 juni.

Jord	Ort	Intercept (graddagar)				Lutningar (graddagarm ² årM ⁻¹)				r ²	n	
		kallt	median	varmt	medel	kallt	median	varmt	medel			medel
Sand	Kri	156	112	135	134	-0.35	-0.29	-0.34	-0.33	0.877	6	
Sand	Upp	97	56	84	79	-0.30	-0.17	-0.21	-0.23	0.862	6	
Sand	Lul	7	34	15	19	-0.03	-0.12	-0.07	-0.07	0.566	6	
Sand	Medel	87	67	78	77	-0.23	-0.19	-0.21	-0.21	0.768	6	
Sand-grw	Kri	140	105	134	126	-0.20	-0.20	-0.29	-0.23	0.743	6	
Sand-grw	Upp	87	57	79	74	-0.21	-0.13	-0.16	-0.17	0.735	6	
Sand-grw	Lul	8	45	14	22	-0.03	-0.15	-0.05	-0.08	0.708	6	
Sand-grw	Medel	78	69	76	74	-0.15	-0.16	-0.17	-0.16	0.729	6	
Silt	Kri	162	103	128	131	-0.28	-0.21	-0.26	-0.25	0.867	6	
Silt	Upp	75	54	76	68	-0.14	-0.14	-0.14	-0.14	0.712	6	
Silt	Lul	6	29	4	13	-0.02	-0.10	-0.01	-0.05	0.547	6	
Silt	Medel	81	62	69	71	-0.15	-0.15	-0.14	-0.14	0.709	6	
Silt-grw	Kri	135	96	130	120	-0.15	-0.17	-0.27	-0.20	0.676	6	
Silt-grw	Upp	81	51	74	69	-0.17	-0.09	-0.14	-0.13	0.705	6	
Silt-grw	Lul	6	29	10	15	-0.02	-0.10	-0.03	-0.05	0.587	6	
Silt-grw	Medel	74	58	71	68	-0.11	-0.12	-0.15	-0.13	0.656	6	
Lera	Kri	129	99	132	120	-0.26	-0.25	-0.31	-0.27	0.938	6	
Lera	Upp	73	51	76	67	-0.16	-0.14	-0.17	-0.16	0.877	6	
Lera	Lul	9	33	4	16	-0.03	-0.10	-0.02	-0.05	0.695	6	
Lera	Medel	70	61	71	68	-0.15	-0.16	-0.17	-0.16	0.837	6	
Torv	Kri	88	95	125	102	-0.16	-0.21	-0.24	-0.20	0.952	6	
Torv	Upp	48	24	77	50	-0.07	-0.07	-0.16	-0.10	0.819	6	
Torv	Lul	1	25	3	10	-0.01	-0.03	-0.01	-0.01	0.789	6	
Torv	Medel	45	48	68	54	-0.08	-0.10	-0.14	-0.11	0.853	6	
Sand	Kri	163	123	147	144	-0.44	-0.44	-0.51	-0.46	0.930	4	
Sand	Upp	109	64	90	88	-0.47	-0.28	-0.32	-0.35	0.898	4	
Sand	Lul	9	34	19	21	-0.06	-0.11	-0.13	-0.10	0.561	4	
Sand	Medel	94	74	85	84	-0.32	-0.27	-0.32	-0.30	0.796	4	
Sand-grw	Kri	160	119	150	143	-0.41	-0.36	-0.48	-0.42	0.963	4	
Sand-grw	Upp	99	67	91	86	-0.37	-0.29	-0.36	-0.34	0.929	4	
Sand-grw	Lul	9	54	18	27	-0.04	-0.28	-0.11	-0.14	0.920	4	
Sand-grw	Medel	89	80	86	85	-0.28	-0.31	-0.32	-0.30	0.938	4	
Silt	Kri	167	114	144	141	-0.33	-0.34	-0.47	-0.38	0.964	4	
Silt	Upp	88	61	81	77	-0.30	-0.25	-0.23	-0.26	0.868	4	
Silt	Lul	7	33	5	15	-0.04	-0.17	-0.04	-0.08	0.692	4	
Silt	Medel	87	69	77	78	-0.22	-0.25	-0.25	-0.24	0.841	4	
Silt-grw	Kri	153	110	147	136	-0.34	-0.34	-0.48	-0.39	0.925	4	
Silt-grw	Upp	85	62	85	77	-0.23	-0.25	-0.33	-0.27	0.887	4	
Silt-grw	Lul	6	35	12	18	-0.03	-0.20	-0.07	-0.10	0.702	4	
Silt-grw	Medel	82	69	81	77	-0.20	-0.26	-0.29	-0.25	0.838	4	
Lera	Kri	136	108	141	128	-0.33	-0.35	-0.42	-0.37	0.979	4	
Lera	Upp	82	58	82	74	-0.28	-0.23	-0.27	-0.26	0.947	4	
Lera	Lul	10	38	5	18	-0.05	-0.17	-0.03	-0.09	0.736	4	
Lera	Medel	76	68	76	73	-0.22	-0.25	-0.24	-0.24	0.888	4	
Torv	Kri	89	94	125	103	-0.18	-0.19	-0.26	-0.21	0.915	4	
Torv	Upp	53	26	76	52	-0.13	-0.10	-0.16	-0.13	0.817	4	
Torv	Lul	1	25	3	9	0.00	-0.02	0.00	-0.01	0.496	4	
Torv	Medel	48	48	68	55	-0.10	-0.10	-0.14	-0.12	0.743	4	

Tabell 4. Temperatursumman T_2-1 , 44–140 cm djup, start – 1 juni.

Jord	Ort	Intercept (graddagar)				Lutningar (graddagarm ² årMJ ⁻¹)				r ²	n	
		kallt	median	varmt	medel	kallt	median	varmt	medel			medel
Sand	Kri	72	58	69	67	-0.28	-0.18	-0.26	-0.24	0.617	6	
Sand	Upp	34	16	30	27	-0.12	-0.06	-0.12	-0.10	0.631	6	
Sand	Lul	0	3	1	1	0.00	-0.02	-0.01	-0.01	0.492	6	
Sand	Medel	36	26	33	31	-0.14	-0.09	-0.13	-0.12	0.580	6	
Sand-grw	Kri	63	50	72	62	-0.20	-0.17	-0.26	-0.21	0.684	6	
Sand-grw	Upp	26	17	33	25	-0.09	-0.06	-0.13	-0.09	0.585	6	
Sand-grw	Lul	-1	8	0	2	0.00	-0.03	0.00	-0.01	0.276	6	
Sand-grw	Medel	29	25	35	30	-0.09	-0.09	-0.13	-0.10	0.515	6	
Silt	Kri	71	45	67	61	-0.21	-0.15	-0.25	-0.20	0.775	6	
Silt	Upp	21	15	22	19	-0.07	-0.06	-0.08	-0.07	0.609	6	
Silt	Lul	1	3	0	1	0.00	-0.02	0.00	-0.01	0.266	6	
Silt	Medel	31	21	30	27	-0.10	-0.07	-0.11	-0.09	0.550	6	
Silt-grw	Kri	56	41	70	56	-0.16	-0.14	-0.26	-0.19	0.659	6	
Silt-grw	Upp	21	14	27	21	-0.07	-0.05	-0.11	-0.08	0.558	6	
Silt-grw	Lul	0	3	1	1	0.00	-0.01	-0.01	-0.01	0.313	6	
Silt-grw	Medel	25	19	33	26	-0.08	-0.07	-0.13	-0.09	0.510	6	
Lera	Kri	31	37	58	42	-0.10	-0.13	-0.21	-0.15	0.660	6	
Lera	Upp	13	7	19	13	-0.04	-0.03	-0.07	-0.05	0.490	6	
Lera	Lul	0	1	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.048	6	
Lera	Medel	15	15	25	18	-0.05	-0.05	-0.10	-0.07	0.399	6	
Torv	Kri	88	95	125	102	-0.16	-0.21	-0.24	-0.20	0.952	6	
Torv	Upp	48	24	77	50	-0.07	-0.07	-0.16	-0.10	0.819	6	
Torv	Lul	1	25	3	10	-0.01	-0.03	-0.01	-0.01	0.789	6	
Torv	Medel	45	48	68	54	-0.08	-0.10	-0.14	-0.11	0.853	6	
Sand	Kri	83	79	85	82	-0.41	-0.43	-0.48	-0.44	0.841	4	
Sand	Upp	42	21	38	34	-0.23	-0.14	-0.26	-0.21	0.794	4	
Sand	Lul	0	4	1	2	-0.01	-0.04	-0.01	-0.02	0.507	4	
Sand	Medel	42	34	42	39	-0.22	-0.20	-0.25	-0.22	0.714	4	
Sand-grw	Kri	82	64	88	78	-0.39	-0.33	-0.47	-0.40	0.884	4	
Sand-grw	Upp	34	23	42	33	-0.20	-0.16	-0.29	-0.21	0.781	4	
Sand-grw	Lul	-1	10	1	3	0.00	-0.06	-0.02	-0.03	0.501	4	
Sand-grw	Medel	38	32	44	38	-0.20	-0.18	-0.26	-0.21	0.722	4	
Silt	Kri	79	56	83	73	-0.30	-0.28	-0.45	-0.35	0.910	4	
Silt	Upp	28	19	28	25	-0.16	-0.12	-0.17	-0.15	0.746	4	
Silt	Lul	1	4	1	2	-0.01	-0.03	-0.02	-0.02	0.618	4	
Silt	Medel	36	26	37	33	-0.16	-0.15	-0.21	-0.17	0.758	4	
Silt-grw	Kri	71	54	87	71	-0.32	-0.29	-0.48	-0.37	0.874	4	
Silt-grw	Upp	29	18	35	27	-0.17	-0.12	-0.24	-0.18	0.751	4	
Silt-grw	Lul	0	4	1	1	0.00	-0.03	-0.01	-0.01	0.366	4	
Silt-grw	Medel	33	25	41	33	-0.16	-0.15	-0.25	-0.19	0.664	4	
Lera	Kri	39	47	73	53	-0.19	-0.25	-0.41	-0.28	0.853	4	
Lera	Upp	18	9	24	17	-0.11	-0.06	-0.17	-0.11	0.669	4	
Lera	Lul	0	1	0	0	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.158	4	
Lera	Medel	19	19	32	24	-0.10	-0.11	-0.20	-0.13	0.560	4	
Torv	Kri	89	94	125	103	-0.18	-0.19	-0.26	-0.21	0.915	4	
Torv	Upp	53	26	76	52	-0.13	-0.10	-0.16	-0.13	0.817	4	
Torv	Lul	1	25	3	9	0.00	-0.02	0.00	-0.01	0.496	4	
Torv	Medel	48	48	68	55	-0.10	-0.10	-0.14	-0.12	0.743	4	

Tabell 5. Temperatursumman T_1-2 , 0–44 cm djup, start – 1 juli.

Jord	Ort	Intercept (graddagar)				Lutningar (graddagarm ² ärMJ ⁻¹)				r ²	n
		kallt	median	varmt	medel	kallt	median	varmt	medel		
Sand	Kri	451	380	429	420	-0.79	-0.72	-0.79	-0.76	0.952	6
Sand	Upp	390	291	381	354	-0.67	-0.57	-0.67	-0.63	0.907	6
Sand	Lul	213	179	178	190	-0.38	-0.40	-0.39	-0.39	0.779	6
Sand	Medel	351	283	329	321	-0.61	-0.56	-0.62	-0.60	0.879	6
Sand-grw	Kri	418	363	425	402	-0.52	-0.53	-0.68	-0.58	0.850	6
Sand-grw	Upp	372	284	363	340	-0.49	-0.42	-0.54	-0.48	0.820	6
Sand-grw	Lul	218	200	190	203	-0.32	-0.49	-0.32	-0.38	0.716	6
Sand-grw	Medel	336	282	326	315	-0.44	-0.48	-0.51	-0.48	0.795	6
Silt	Kri	457	355	408	407	-0.65	-0.52	-0.63	-0.60	0.913	6
Silt	Upp	350	272	355	326	-0.42	-0.44	-0.48	-0.44	0.810	6
Silt	Lul	197	160	163	173	-0.28	-0.35	-0.27	-0.30	0.688	6
Silt	Medel	334	262	309	302	-0.45	-0.44	-0.46	-0.45	0.804	6
Silt-grw	Kri	400	346	411	386	-0.41	-0.44	-0.65	-0.50	0.824	6
Silt-grw	Upp	354	265	347	322	-0.40	-0.34	-0.46	-0.40	0.792	6
Silt-grw	Lul	195	162	168	175	-0.23	-0.33	-0.21	-0.26	0.596	6
Silt-grw	Medel	317	257	309	294	-0.35	-0.37	-0.44	-0.39	0.737	6
Lera	Kri	410	354	415	393	-0.62	-0.62	-0.68	-0.64	0.990	6
Lera	Upp	354	275	358	329	-0.49	-0.49	-0.57	-0.52	0.969	6
Lera	Lul	219	179	158	185	-0.38	-0.43	-0.34	-0.39	0.911	6
Lera	Medel	327	269	310	302	-0.50	-0.52	-0.53	-0.52	0.957	6
Torv	Kri	302	321	374	332	-0.54	-0.57	-0.60	-0.57	0.954	6
Torv	Upp	274	196	329	266	-0.46	-0.43	-0.61	-0.50	0.899	6
Torv	Lul	108	106	126	113	-0.15	-0.19	-0.25	-0.20	0.979	6
Torv	Medel	228	207	276	237	-0.38	-0.40	-0.49	-0.42	0.944	6
Sand	Kri	463	400	443	435	-0.94	-0.96	-0.96	-0.95	0.982	4
Sand	Upp	419	308	386	371	-1.08	-0.83	-0.73	-0.88	0.934	4
Sand	Lul	228	189	201	206	-0.57	-0.55	-0.73	-0.62	0.863	4
Sand	Medel	370	299	343	337	-0.86	-0.78	-0.81	-0.82	0.926	4
Sand-grw	Kri	460	387	431	426	-0.96	-0.80	-0.71	-0.82	0.963	4
Sand-grw	Upp	410	310	378	366	-0.96	-0.81	-0.75	-0.84	0.983	4
Sand-grw	Lul	231	223	216	223	-0.50	-0.83	-0.73	-0.69	0.887	4
Sand-grw	Medel	367	306	341	338	-0.80	-0.81	-0.73	-0.78	0.944	4
Silt	Kri	459	370	423	418	-0.67	-0.69	-0.79	-0.72	0.901	4
Silt	Upp	382	296	352	343	-0.84	-0.82	-0.36	-0.67	0.949	4
Silt	Lul	212	178	182	191	-0.47	-0.61	-0.57	-0.55	0.863	4
Silt	Medel	351	282	319	317	-0.66	-0.71	-0.57	-0.65	0.904	4
Silt-grw	Kri	444	355	420	406	-0.87	-0.52	-0.73	-0.71	0.962	4
Silt-grw	Upp	380	294	360	345	-0.76	-0.78	-0.64	-0.73	0.967	4
Silt-grw	Lul	210	185	182	192	-0.42	-0.67	-0.41	-0.50	0.793	4
Silt-grw	Medel	344	278	321	314	-0.68	-0.66	-0.59	-0.64	0.907	4
Lera	Kri	415	362	416	397	-0.67	-0.71	-0.70	-0.69	0.984	4
Lera	Upp	370	280	356	335	-0.71	-0.56	-0.55	-0.60	0.980	4
Lera	Lul	229	189	166	194	-0.50	-0.57	-0.46	-0.51	0.921	4
Lera	Medel	338	277	313	309	-0.63	-0.61	-0.57	-0.60	0.962	4
Torv	Kri	310	318	383	337	-0.63	-0.55	-0.74	-0.64	0.942	4
Torv	Upp	295	205	334	278	-0.71	-0.55	-0.72	-0.66	0.906	4
Torv	Lul	108	106	122	112	-0.15	-0.19	-0.18	-0.18	0.970	4
Torv	Medel	237	209	279	242	-0.50	-0.43	-0.55	-0.49	0.939	4

Tabell 6. Temperatursumman $T_2-2, 44-140$ cm djup, start - 1 juli.

Jord	Ort	Intercept (graddagar)				Lutningar (graddagarm ² årMJ ⁻¹)				r ²	n
		kallt	median	varmt	medel	kallt	median	varmt	medel		
Sand	Kri	299	257	292	283	-1.06	-0.84	-1.00	-0.97	0.901	6
Sand	Upp	209	160	230	200	-0.69	-0.56	-0.80	-0.69	0.842	6
Sand	Lul	93	65	62	73	-0.36	-0.28	-0.28	-0.31	0.642	6
Sand	Medel	200	160	195	185	-0.70	-0.56	-0.70	-0.65	0.795	6
Sand-grw	Kri	260	232	287	259	-0.76	-0.71	-0.90	-0.79	0.898	6
Sand-grw	Upp	191	163	217	190	-0.56	-0.54	-0.74	-0.61	0.847	6
Sand-grw	Lul	101	81	85	89	-0.36	-0.34	-0.38	-0.36	0.740	6
Sand-grw	Medel	184	158	196	179	-0.56	-0.53	-0.67	-0.59	0.828	6
Silt	Kri	306	225	277	269	-0.85	-0.67	-0.90	-0.81	0.933	6
Silt	Upp	179	149	212	180	-0.54	-0.49	-0.67	-0.57	0.836	6
Silt	Lul	82	54	55	64	-0.30	-0.23	-0.24	-0.26	0.671	6
Silt	Medel	189	142	181	171	-0.57	-0.47	-0.60	-0.55	0.813	6
Silt-grw	Kri	243	213	270	242	-0.68	-0.60	-0.87	-0.71	0.887	6
Silt-grw	Upp	171	143	197	170	-0.46	-0.47	-0.66	-0.53	0.818	6
Silt-grw	Lul	77	54	61	64	-0.27	-0.24	-0.25	-0.25	0.675	6
Silt-grw	Medel	163	137	176	159	-0.47	-0.44	-0.59	-0.50	0.793	6
Lera	Kri	205	189	244	213	-0.58	-0.59	-0.79	-0.65	0.912	6
Lera	Upp	146	119	178	148	-0.43	-0.38	-0.60	-0.47	0.892	6
Lera	Lul	85	43	35	55	-0.31	-0.18	-0.16	-0.21	0.720	6
Lera	Medel	145	117	153	138	-0.44	-0.39	-0.51	-0.45	0.841	6
Torv	Kri	302	321	374	332	-0.54	-0.57	-0.60	-0.57	0.954	6
Torv	Upp	274	196	329	266	-0.46	-0.43	-0.61	-0.50	0.899	6
Torv	Lul	108	106	126	113	-0.15	-0.19	-0.25	-0.20	0.979	6
Torv	Medel	228	207	276	237	-0.38	-0.40	-0.49	-0.42	0.944	6
Sand	Kri	324	294	319	312	-1.38	-1.30	-1.35	-1.34	0.984	4
Sand	Upp	247	188	247	228	-1.25	-1.00	-1.06	-1.10	0.942	4
Sand	Lul	114	81	82	92	-0.64	-0.52	-0.59	-0.58	0.836	4
Sand	Medel	228	188	216	211	-1.09	-0.94	-1.00	-1.01	0.921	4
Sand-grw	Kri	311	259	295	288	-1.30	-1.02	-0.97	-1.10	0.983	4
Sand-grw	Upp	235	192	236	221	-1.14	-0.97	-1.02	-1.04	0.990	4
Sand-grw	Lul	119	100	105	108	-0.59	-0.63	-0.71	-0.64	0.889	4
Sand-grw	Medel	222	184	212	206	-1.01	-0.87	-0.90	-0.93	0.954	4
Silt	Kri	315	245	295	285	-0.93	-0.89	-1.11	-0.98	0.936	4
Silt	Upp	218	178	205	200	-1.07	-0.92	-0.51	-0.83	0.931	4
Silt	Lul	102	69	69	80	-0.56	-0.46	-0.46	-0.49	0.866	4
Silt	Medel	212	164	190	188	-0.85	-0.76	-0.69	-0.77	0.911	4
Silt-grw	Kri	294	222	283	266	-1.20	-0.68	-1.01	-0.97	0.962	4
Silt-grw	Upp	213	172	211	199	-1.02	-0.89	-0.85	-0.92	0.986	4
Silt-grw	Lul	94	69	72	78	-0.50	-0.46	-0.41	-0.45	0.819	4
Silt-grw	Medel	200	154	188	181	-0.91	-0.68	-0.76	-0.78	0.922	4
Lera	Kri	232	216	265	238	-0.86	-0.90	-1.04	-0.94	0.992	4
Lera	Upp	172	136	191	166	-0.78	-0.63	-0.79	-0.73	0.988	4
Lera	Lul	102	53	44	67	-0.53	-0.32	-0.30	-0.38	0.870	4
Lera	Medel	169	135	167	157	-0.72	-0.62	-0.71	-0.68	0.950	4
Torv	Kri	310	318	383	337	-0.63	-0.55	-0.74	-0.64	0.942	4
Torv	Upp	295	205	334	278	-0.71	-0.55	-0.72	-0.66	0.906	4
Torv	Lul	108	106	122	112	-0.15	-0.19	-0.18	-0.18	0.970	4
Torv	Medel	237	209	279	242	-0.50	-0.43	-0.55	-0.49	0.939	4

Tabell 7. Temperatursumman $T_1-3, 0-44$ cm djup, 1 juli – slut.

Jord	Ort	Intercept (graddagar)				Lutningar (graddagarm ² ärMJ ⁻¹)				r ²	n
		kallt	median	varmt	medel	kallt	median	varmt	medel		
Sand	Kri	1141	1012	1100	1084	-0.84	-1.07	-0.71	-0.87	0.954	6
Sand	Upp	907	852	975	911	-0.83	-0.99	-0.93	-0.91	0.966	6
Sand	Lul	645	632	738	672	-0.75	-0.75	-1.02	-0.84	0.947	6
Sand	Medel	897	832	938	889	-0.80	-0.94	-0.89	-0.87	0.956	6
Sand-grw	Kri	1167	1017	1112	1099	-1.53	-1.29	-0.92	-1.25	0.895	6
Sand-grw	Upp	899	850	973	907	-1.14	-1.22	-1.20	-1.19	0.938	6
Sand-grw	Lul	655	628	742	675	-1.08	-1.21	-1.41	-1.23	0.926	6
Sand-grw	Medel	907	832	942	894	-1.25	-1.24	-1.18	-1.22	0.919	6
Silt	Kri	1178	1092	1121	1130	-1.22	-1.44	-1.08	-1.25	0.847	6
Silt	Upp	900	856	983	913	-1.17	-1.27	-1.25	-1.23	0.933	6
Silt	Lul	641	608	712	653	-1.04	-1.08	-1.34	-1.16	0.938	6
Silt	Medel	906	852	939	899	-1.14	-1.26	-1.23	-1.21	0.906	6
Silt-grw	Kri	1169	1055	1109	1111	-1.44	-1.44	-0.93	-1.27	0.924	6
Silt-grw	Upp	890	843	974	902	-1.17	-1.24	-1.31	-1.24	0.915	6
Silt-grw	Lul	641	608	717	655	-1.00	-1.12	-1.04	-1.05	0.869	6
Silt-grw	Medel	900	835	933	889	-1.20	-1.27	-1.09	-1.19	0.903	6
Lera	Kri	1135	1025	1091	1084	-0.93	-1.06	-0.71	-0.90	0.975	6
Lera	Upp	888	832	948	889	-0.82	-0.88	-0.73	-0.81	0.960	6
Lera	Lul	642	621	704	656	-0.71	-0.81	-0.85	-0.79	0.971	6
Lera	Medel	889	826	915	876	-0.82	-0.92	-0.76	-0.83	0.969	6
Torv	Kri	971	888	1024	961	-1.12	-1.47	-2.06	-1.55	0.911	6
Torv	Upp	729	777	907	804	-0.95	-1.75	-1.59	-1.43	0.895	6
Torv	Lul	401	525	624	516	-1.26	-1.86	-1.81	-1.64	0.935	6
Torv	Medel	700	730	852	761	-1.11	-1.69	-1.82	-1.54	0.914	6
Sand	Kri	1133	980	1087	1067	-0.75	-0.68	-0.52	-0.65	0.966	4
Sand	Upp	903	837	948	896	-0.78	-0.70	-0.44	-0.64	0.984	4
Sand	Lul	642	632	725	666	-0.66	-0.74	-0.85	-0.75	0.962	4
Sand	Medel	893	816	920	876	-0.73	-0.71	-0.60	-0.68	0.971	4
Sand-grw	Kri	1137	955	1076	1056	-1.20	-0.58	-0.51	-0.76	0.942	4
Sand-grw	Upp	904	810	929	881	-1.19	-0.60	-0.53	-0.77	0.962	4
Sand-grw	Lul	652	644	752	682	-1.00	-1.40	-1.52	-1.30	0.860	4
Sand-grw	Medel	897	803	919	873	-1.13	-0.86	-0.85	-0.95	0.921	4
Silt	Kri	1119	1011	1076	1069	-0.55	-0.47	-0.55	-0.52	0.723	4
Silt	Upp	913	826	928	889	-1.31	-0.79	-0.36	-0.82	0.938	4
Silt	Lul	644	632	731	669	-1.06	-1.42	-1.60	-1.36	0.921	4
Silt	Medel	892	823	912	876	-0.98	-0.89	-0.84	-0.90	0.860	4
Silt-grw	Kri	1131	997	1079	1069	-1.00	-0.76	-0.58	-0.78	0.940	4
Silt-grw	Upp	907	813	924	882	-1.29	-0.71	-0.51	-0.84	0.964	4
Silt-grw	Lul	628	635	738	667	-0.78	-1.48	-1.41	-1.22	0.847	4
Silt-grw	Medel	889	815	914	872	-1.03	-0.98	-0.83	-0.95	0.917	4
Lera	Kri	1114	1013	1080	1069	-0.70	-0.93	-0.58	-0.73	0.973	4
Lera	Upp	884	811	931	875	-0.74	-0.54	-0.48	-0.59	0.990	4
Lera	Lul	639	619	700	653	-0.67	-0.78	-0.77	-0.74	0.916	4
Lera	Medel	879	815	904	866	-0.70	-0.75	-0.61	-0.69	0.960	4
Torv	Kri	1007	919	1026	984	-1.55	-1.75	-2.01	-1.77	0.968	4
Torv	Upp	776	754	924	818	-1.53	-1.50	-1.83	-1.62	0.881	4
Torv	Lul	419	550	604	524	-1.57	-2.28	-1.43	-1.76	0.923	4
Torv	Medel	734	741	851	775	-1.55	-1.84	-1.76	-1.72	0.924	4

Tabell 8. Temperatursumman T₂-3, 44-140 cm djup, 1 juli - slut.

Jord	Ort	Intercept (graddagar)				Lutningar (graddagarm ² årM ⁻¹)				r ²	n
		kallt	median	varmt	medel	kallt	median	varmt	medel		
Sand	Kri	1129	1011	1067	1069	-2.02	-2.27	-1.81	-2.03	0.981	6
Sand	Upp	864	825	952	880	-1.88	-2.07	-2.15	-2.04	0.979	6
Sand	Lul	568	543	641	584	-1.57	-1.64	-2.11	-1.77	0.972	6
Sand	Medel	853	793	887	844	-1.82	-1.99	-2.02	-1.95	0.977	6
Sand-grw	Kri	1119	988	1080	1062	-2.74	-2.33	-2.01	-2.36	0.939	6
Sand-grw	Upp	817	786	923	842	-2.08	-2.09	-2.36	-2.18	0.964	6
Sand-grw	Lul	567	519	641	576	-1.81	-1.99	-2.52	-2.11	0.916	6
Sand-grw	Medel	834	764	881	827	-2.21	-2.14	-2.30	-2.21	0.940	6
Silt	Kri	1196	1034	1114	1115	-2.53	-2.44	-2.36	-2.44	0.919	6
Silt	Upp	843	806	955	868	-2.22	-2.20	-2.48	-2.30	0.953	6
Silt	Lul	546	496	596	546	-1.77	-1.85	-2.39	-2.00	0.920	6
Silt	Medel	861	779	888	843	-2.17	-2.16	-2.41	-2.25	0.931	6
Silt-grw	Kri	1143	1029	1090	1087	-2.69	-2.46	-2.04	-2.40	0.948	6
Silt-grw	Upp	822	791	925	846	-2.13	-2.22	-2.48	-2.28	0.948	6
Silt-grw	Lul	552	499	615	555	-1.71	-1.93	-2.02	-1.89	0.888	6
Silt-grw	Medel	839	773	877	829	-2.18	-2.20	-2.18	-2.19	0.928	6
Lera	Kri	1086	977	1051	1038	-2.19	-2.21	-1.91	-2.10	0.984	6
Lera	Upp	797	764	890	817	-1.83	-1.91	-1.92	-1.89	0.973	6
Lera	Lul	558	496	551	535	-1.59	-1.64	-1.83	-1.68	0.959	6
Lera	Medel	813	745	830	796	-1.87	-1.92	-1.89	-1.89	0.972	6
Torv	Kri	971	888	1024	961	-1.12	-1.47	-2.06	-1.55	0.911	6
Torv	Upp	729	777	907	804	-0.95	-1.75	-1.59	-1.43	0.895	6
Torv	Lul	401	525	624	516	-1.26	-1.86	-1.81	-1.64	0.935	6
Torv	Medel	700	730	852	761	-1.11	-1.69	-1.82	-1.54	0.914	6
Sand	Kri	1123	971	1039	1044	-1.94	-1.78	-1.41	-1.71	0.987	4
Sand	Upp	861	812	901	858	-1.82	-1.80	-1.23	-1.62	0.991	4
Sand	Lul	574	553	637	588	-1.59	-1.76	-2.05	-1.80	0.982	4
Sand	Medel	853	779	859	830	-1.78	-1.78	-1.56	-1.71	0.986	4
Sand-grw	Kri	1119	915	1019	1017	-2.68	-1.46	-1.32	-1.82	0.963	4
Sand-grw	Upp	849	754	861	821	-2.45	-1.57	-1.37	-1.80	0.976	4
Sand-grw	Lul	585	566	684	612	-1.99	-2.62	-3.12	-2.58	0.902	4
Sand-grw	Medel	851	745	855	817	-2.38	-1.88	-1.94	-2.06	0.947	4
Silt	Kri	1097	949	1034	1026	-1.39	-1.42	-1.39	-1.40	0.974	4
Silt	Upp	880	790	865	845	-2.65	-1.90	-0.95	-1.83	0.949	4
Silt	Lul	575	548	651	591	-2.10	-2.59	-3.19	-2.63	0.948	4
Silt	Medel	851	762	850	821	-2.05	-1.97	-1.85	-1.95	0.957	4
Silt-grw	Kri	1116	943	1037	1032	-2.30	-1.42	-1.42	-1.72	0.971	4
Silt-grw	Upp	867	770	857	831	-2.60	-1.78	-1.31	-1.90	0.975	4
Silt-grw	Lul	549	553	662	588	-1.59	-2.68	-2.82	-2.36	0.888	4
Silt-grw	Medel	844	755	852	817	-2.16	-1.96	-1.85	-1.99	0.944	4
Lera	Kri	1063	960	1026	1016	-1.90	-1.99	-1.62	-1.84	0.991	4
Lera	Upp	815	744	857	805	-2.02	-1.53	-1.45	-1.67	0.994	4
Lera	Lul	573	515	561	550	-1.74	-1.90	-1.94	-1.86	0.933	4
Lera	Medel	817	740	814	790	-1.89	-1.80	-1.67	-1.79	0.973	4
Torv	Kri	1007	919	1026	984	-1.55	-1.75	-2.01	-1.77	0.968	4
Torv	Upp	776	754	924	818	-1.53	-1.50	-1.83	-1.62	0.881	4
Torv	Lul	419	550	604	524	-1.57	-2.28	-1.43	-1.76	0.923	4
Torv	Medel	734	741	851	775	-1.55	-1.84	-1.76	-1.72	0.924	4

Tabell 9. Vegetationssäsongens början.

Jord	Ort	Intercept (dag)				Lutningar (dagm ² ärMJ ⁻¹)				r ²	n
		kallt	median	varmt	medel	kallt	median	varmt	medel		
Sand	Kri	117	112	96	108	7.5	11.8	16.8	12.0	0.813	6
Sand	Upp	129	126	123	126	8.0	10.6	8.7	9.1	0.902	6
Sand	Lul	151	151	146	149	4.0	5.6	7.1	5.6	0.587	6
Sand	Medel	132	130	122	128	6.5	9.3	10.9	8.9	0.767	6
Sand-grw	Kri	121	110	100	110	3.9	10.9	12.7	9.1	0.709	6
Sand-grw	Upp	131	127	124	127	6.0	6.9	7.2	6.7	0.716	6
Sand-grw	Lul	148	140	143	144	4.4	10.1	4.6	6.4	0.680	6
Sand-grw	Medel	133	126	122	127	4.7	9.3	8.1	7.4	0.702	6
Silt	Kri	112	111	100	108	7.7	10.5	12.7	10.3	0.767	6
Silt	Upp	132	128	125	128	5.9	8.4	6.9	7.1	0.782	6
Silt	Lul	152	151	149	150	3.3	6.4	5.1	4.9	0.601	6
Silt	Medel	132	130	125	129	5.6	8.4	8.2	7.4	0.717	6
Silt-grw	Kri	118	111	96	108	3.1	10.6	16.8	10.1	0.750	6
Silt-grw	Upp	129	129	124	128	5.7	6.1	7.1	6.3	0.729	6
Silt-grw	Lul	149	146	148	147	3.8	7.9	2.7	4.8	0.573	6
Silt-grw	Medel	132	129	123	128	4.2	8.2	8.9	7.1	0.684	6
Lera	Kri	122	110	96	109	6.6	14.4	17.9	12.9	0.898	6
Lera	Upp	132	126	124	127	7.8	11.7	8.6	9.4	0.928	6
Lera	Lul	148	144	152	148	5.0	11.4	8.2	8.2	0.875	6
Lera	Medel	134	127	124	128	6.4	12.5	11.6	10.2	0.900	6
Torv	Kri	147	117	118	127	15.1	26.5	22.0	21.2	0.923	6
Torv	Upp	147	152	131	143	16.8	19.4	20.2	18.8	0.949	6
Torv	Lul	199	182	166	182	7.8	15.6	17.2	13.5	0.834	6
Torv	Medel	164	150	138	151	13.2	20.5	19.8	17.8	0.902	6
Sand	Kri	118	106	88	104	5.5	19.1	27.8	17.5	0.854	4
Sand	Upp	127	123	121	124	10.2	16.6	11.6	12.8	0.867	4
Sand	Lul	149	147	142	146	6.1	11.4	13.4	10.3	0.737	4
Sand	Medel	132	125	117	125	7.3	15.7	17.6	13.5	0.819	4
Sand-grw	Kri	118	105	87	103	7.1	17.0	28.0	17.3	0.925	4
Sand-grw	Upp	128	119	121	123	9.8	19.3	12.3	13.8	0.878	4
Sand-grw	Lul	146	135	139	140	6.6	17.5	11.5	11.9	0.871	4
Sand-grw	Medel	130	120	115	122	7.8	17.9	17.3	14.3	0.891	4
Silt	Kri	113	106	88	102	5.3	16.4	28.1	16.6	0.886	4
Silt	Upp	129	122	122	124	9.3	17.4	11.6	12.8	0.884	4
Silt	Lul	150	146	146	147	5.7	12.4	10.8	9.6	0.788	4
Silt	Medel	131	125	118	125	6.8	15.4	16.8	13.0	0.853	4
Silt-grw	Kri	115	106	87	102	6.2	16.5	28.6	17.1	0.888	4
Silt-grw	Upp	132	122	121	125	2.7	17.1	12.9	10.9	0.855	4
Silt-grw	Lul	147	141	144	144	6.2	15.3	7.9	9.8	0.805	4
Silt-grw	Medel	131	123	117	124	5.0	16.3	16.5	12.6	0.849	4
Lera	Kri	119	108	88	105	9.9	17.5	27.5	18.3	0.939	4
Lera	Upp	130	125	122	125	10.6	13.3	12.2	12.0	0.867	4
Lera	Lul	146	142	150	146	7.7	15.3	11.5	11.5	0.918	4
Lera	Medel	131	125	120	125	9.4	15.4	17.1	14.0	0.908	4
Torv	Kri	145	109	111	122	17.0	35.8	30.7	27.8	0.941	4
Torv	Upp	142	146	125	138	23.5	26.4	29.1	26.3	0.989	4
Torv	Lul	197	177	172	182	10.3	24.0	6.9	13.7	0.857	4
Torv	Medel	161	144	136	147	16.9	28.7	22.2	22.6	0.929	4

Tabell 10. Vegetationssäsongens slut.

Jord	Ort	Intercept (dag)				Lutningar (dagm ² årMJ ⁻¹)				r ²	n
		kallt	median	varmt	medel	kallt	median	varmt	medel		
Sand	Kri	344	324	313	327	-9.1	-5.2	-7.8	-7.4	0.721	6
Sand	Upp	308	321	291	307	-8.4	-8.3	-0.5	-5.8	0.860	6
Sand	Lul	273	280	287	280	-2.4	-6.9	-10.3	-6.5	0.896	6
Sand	Medel	308	308	297	304	-6.6	-6.8	-6.2	-6.5	0.826	6
Sand-grw	Kri	348	324	313	328	-11.6	-5.0	-7.6	-8.1	0.696	6
Sand-grw	Upp	308	322	296	308	-8.0	-9.6	-4.6	-7.4	0.813	6
Sand-grw	Lul	275	281	287	281	-4.5	-9.6	-12.2	-8.8	0.878	6
Sand-grw	Medel	310	309	299	306	-8.0	-8.1	-8.1	-8.1	0.796	6
Silt	Kri	346	341	314	334	-8.2	-9.9	-7.2	-8.4	0.794	6
Silt	Upp	308	321	297	309	-7.7	-8.4	-5.2	-7.1	0.848	6
Silt	Lul	276	283	288	282	-4.7	-8.7	-13.7	-9.0	0.922	6
Silt	Medel	310	315	300	308	-6.9	-9.0	-8.7	-8.2	0.855	6
Silt-grw	Kri	350	335	318	334	-12.1	-8.5	-8.4	-9.7	0.784	6
Silt-grw	Upp	308	322	298	309	-9.4	-8.7	-5.8	-8.0	0.845	6
Silt-grw	Lul	277	284	291	284	-5.7	-10.8	-10.6	-9.0	0.857	6
Silt-grw	Medel	312	313	302	309	-9.1	-9.3	-8.3	-8.9	0.829	6
Lera	Kri	347	333	319	333	-8.2	-7.7	-8.4	-8.1	0.852	6
Lera	Upp	310	322	296	309	-7.3	-8.2	-1.8	-5.8	0.841	6
Lera	Lul	275	282	288	282	-3.0	-6.8	-10.5	-6.8	0.903	6
Lera	Medel	311	312	301	308	-6.2	-7.6	-6.9	-6.9	0.865	6
Torv	Kri	337	325	326	329	-10.1	-15.9	-26.2	-17.4	0.795	6
Torv	Upp	295	330	304	310	-9.6	-28.0	-18.3	-18.6	0.841	6
Torv	Lul	268	280	286	278	-25.9	-29.7	-28.9	-28.2	0.869	6
Torv	Medel	300	312	306	306	-15.2	-24.5	-24.5	-21.4	0.835	6
Sand	Kri	342	321	317	327	-6.3	-2.0	-12.8	-7.0	0.772	4
Sand	Upp	307	316	292	305	-7.7	-1.6	-0.7	-3.3	0.831	4
Sand	Lul	272	279	287	279	-1.0	-6.3	-10.3	-5.9	0.826	4
Sand	Medel	307	306	298	304	-5.0	-3.3	-7.9	-5.4	0.809	4
Sand-grw	Kri	341	321	317	327	-6.0	-2.2	-12.5	-6.9	0.766	4
Sand-grw	Upp	307	316	294	306	-7.7	-1.6	-2.6	-3.9	0.795	4
Sand-grw	Lul	273	279	290	280	-1.4	-6.5	-16.5	-8.1	0.929	4
Sand-grw	Medel	307	306	300	304	-5.0	-3.4	-10.5	-6.3	0.830	4
Silt	Kri	342	339	317	333	-5.0	-7.6	-12.0	-8.2	0.700	4
Silt	Upp	308	317	296	307	-7.8	-1.7	-3.3	-4.3	0.857	4
Silt	Lul	273	282	290	282	-1.6	-8.1	-15.7	-8.5	0.901	4
Silt	Medel	308	313	301	307	-4.8	-5.8	-10.4	-7.0	0.819	4
Silt-grw	Kri	343	334	323	333	-5.1	-8.0	-14.1	-9.1	0.769	4
Silt-grw	Upp	308	318	296	307	-7.8	-2.2	-3.8	-4.6	0.891	4
Silt-grw	Lul	274	283	289	282	-1.4	-8.3	-9.0	-6.2	0.859	4
Silt-grw	Medel	308	311	303	307	-4.8	-6.2	-9.0	-6.6	0.840	4
Lera	Kri	343	332	322	333	-5.0	-7.9	-13.5	-8.8	0.815	4
Lera	Upp	305	318	296	307	-0.9	-1.7	-3.1	-1.9	0.912	4
Lera	Lul	274	283	288	282	-1.4	-8.1	-10.7	-6.8	0.850	4
Lera	Medel	308	311	302	307	-2.4	-5.9	-9.1	-5.8	0.859	4
Torv	Kri	341	324	320	328	-14.7	-12.6	-16.4	-14.6	0.851	4
Torv	Upp	299	321	302	307	-14.8	-16.5	-14.4	-15.2	0.782	4
Torv	Lul	273	285	281	280	-35.0	-38.3	-17.9	-30.4	0.836	4
Torv	Medel	304	310	301	305	-21.5	-22.4	-16.2	-20.1	0.823	4

Tabell 11. Vegetationssäsongens längd.

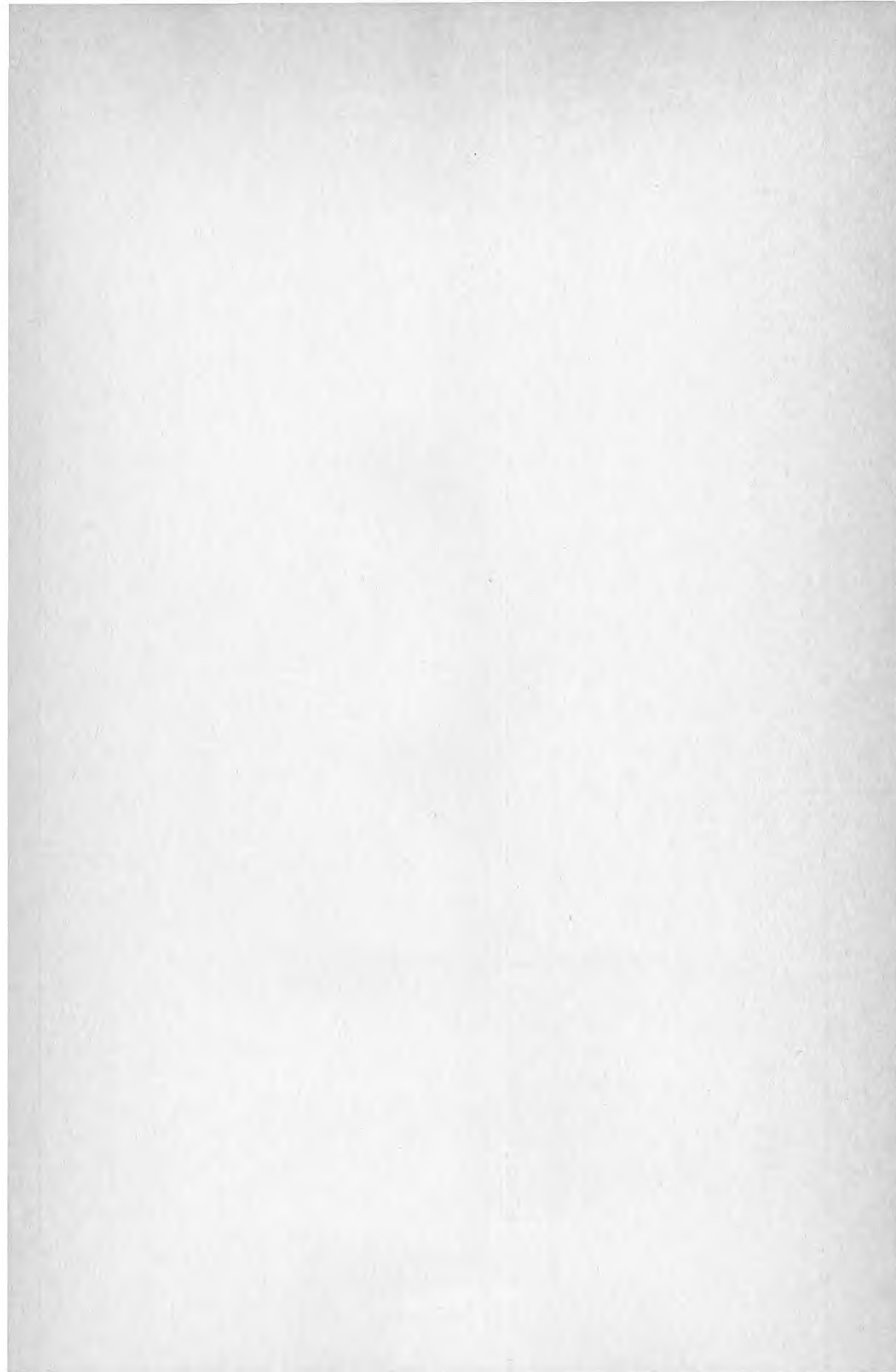
Jord	Ort	Intercept (dagar)				Lutningar (dagarm ² årM) ⁻¹)				r ²	n
		kallt	median	varmt	medel	kallt	median	varmt	medel		
Sand	Kri	227	211	216	218	-16.6	-16.9	-24.6	-19.4	0.867	6
Sand	Upp	179	194	168	180	-16.4	-19.0	-9.2	-14.9	0.948	6
Sand	Lul	122	128	140	130	-6.4	-12.5	-17.4	-12.1	0.873	6
Sand	Medel	176	178	175	176	-13.2	-16.1	-17.1	-15.5	0.896	6
Sand-grw	Kri	227	214	213	218	-15.5	-15.9	-20.2	-17.2	0.818	6
Sand-grw	Upp	176	194	171	180	-14.0	-16.5	-11.8	-14.1	0.951	6
Sand-grw	Lul	127	140	144	137	-8.9	-19.8	-16.8	-15.2	0.901	6
Sand-grw	Medel	177	183	176	178	-12.8	-17.4	-16.3	-15.5	0.890	6
Silt	Kri	234	230	213	225	-15.9	-20.4	-19.9	-18.7	0.826	6
Silt	Upp	175	193	172	180	-13.6	-16.8	-12.0	-14.1	0.952	6
Silt	Lul	124	132	139	131	-8.0	-15.1	-18.8	-13.9	0.911	6
Silt	Medel	178	185	175	179	-12.5	-17.4	-16.9	-15.6	0.896	6
Silt-grw	Kri	232	223	222	226	-15.2	-19.1	-25.2	-19.8	0.880	6
Silt-grw	Upp	178	192	173	181	-15.1	-14.8	-12.9	-14.3	0.951	6
Silt-grw	Lul	127	137	143	136	-9.5	-18.7	-13.3	-13.8	0.931	6
Silt-grw	Medel	179	184	179	181	-13.3	-17.5	-17.1	-16.0	0.920	6
Lera	Kri	224	222	222	223	-14.7	-22.1	-26.3	-21.1	0.944	6
Lera	Upp	178	196	171	181	-15.2	-19.9	-10.4	-15.1	0.956	6
Lera	Lul	127	137	135	133	-8.0	-18.1	-18.7	-14.9	0.950	6
Lera	Medel	176	185	176	179	-12.6	-20.0	-18.5	-17.0	0.950	6
Torv	Kri	190	207	208	201	-25.2	-42.3	-48.1	-38.6	0.930	6
Torv	Upp	147	178	173	166	-26.3	-47.4	-38.5	-37.4	0.947	6
Torv	Lul	69	98	120	96	-33.7	-45.3	-46.1	-41.7	0.875	6
Torv	Medel	135	161	167	154	-28.4	-45.0	-44.2	-39.2	0.917	6
Sand	Kri	223	214	228	222	-11.8	-21.1	-40.6	-24.5	0.897	4
Sand	Upp	179	193	170	181	-17.8	-18.3	-12.3	-16.1	0.866	4
Sand	Lul	123	132	145	133	-7.1	-17.8	-23.7	-16.2	0.868	4
Sand	Medel	175	180	181	179	-12.3	-19.0	-25.5	-18.9	0.877	4
Sand-grw	Kri	223	216	230	223	-13.1	-19.1	-40.5	-24.2	0.922	4
Sand-grw	Upp	179	197	173	183	-17.5	-20.9	-14.8	-17.7	0.905	4
Sand-grw	Lul	126	143	151	140	-8.0	-23.9	-28.0	-20.0	0.909	4
Sand-grw	Medel	176	185	184	182	-12.9	-21.3	-27.8	-20.6	0.912	4
Silt	Kri	229	233	229	230	-10.3	-24.0	-40.2	-24.9	0.850	4
Silt	Upp	178	194	174	182	-17.1	-19.1	-14.9	-17.0	0.896	4
Silt	Lul	123	135	143	134	-7.3	-20.6	-26.5	-18.1	0.868	4
Silt	Medel	177	187	182	182	-11.6	-21.2	-27.2	-20.0	0.871	4
Silt-grw	Kri	228	228	235	230	-11.3	-24.6	-42.7	-26.2	0.952	4
Silt-grw	Upp	176	195	175	182	-10.5	-19.3	-16.7	-15.5	0.922	4
Silt-grw	Lul	126	141	145	137	-7.6	-23.6	-16.9	-16.0	0.910	4
Silt-grw	Medel	176	188	185	183	-9.8	-22.5	-25.4	-19.2	0.928	4
Lera	Kri	224	224	234	227	-14.8	-25.5	-41.1	-27.1	0.960	4
Lera	Upp	175	193	174	181	-11.5	-15.0	-15.3	-13.9	0.907	4
Lera	Lul	128	141	138	135	-9.2	-23.4	-22.2	-18.3	0.943	4
Lera	Medel	176	186	182	181	-11.8	-21.3	-26.2	-19.8	0.937	4
Torv	Kri	195	214	208	206	-31.7	-48.4	-47.1	-42.4	0.966	4
Torv	Upp	157	174	176	169	-38.4	-42.8	-43.5	-41.6	0.941	4
Torv	Lul	76	108	108	97	-45.3	-62.3	-24.8	-44.1	0.911	4
Torv	Medel	143	165	164	157	-38.5	-51.2	-38.5	-42.7	0.939	4

Tabell 12. Maximalt tjäldjup.

Jord	Ort	Intercept (m)				Lutningar (m ³ årMJ ⁻¹)				r ²	n
		kallt	median	varmt	medel	kallt	median	varmt	medel		
Sand	Kri	-0.6	-0.4	0.0	-0.3	-0.80	-0.72	-0.77	-0.76	0.950	6
Sand	Upp	-0.8	-0.8	-0.3	-0.6	-0.53	-0.58	-0.71	-0.61	0.883	6
Sand	Lul	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8	-0.58	-0.84	-0.66	-0.69	0.872	6
Sand	Medel	-0.7	-0.7	-0.4	-0.6	-0.64	-0.71	-0.71	-0.69	0.902	6
Sand-grw	Kri	-0.6	-0.4	-0.4	-0.5	-0.36	-0.28	-0.31	-0.32	0.798	6
Sand-grw	Upp	-0.7	-0.6	-0.5	-0.6	-0.44	-0.28	-0.26	-0.33	0.793	6
Sand-grw	Lul	-0.5	-0.7	-0.5	-0.6	-0.51	-0.52	-0.60	-0.54	0.902	6
Sand-grw	Medel	-0.6	-0.6	-0.5	-0.5	-0.44	-0.36	-0.39	-0.40	0.831	6
Silt	Kri	-0.6	-0.3	-0.3	-0.4	-0.46	-0.44	-0.35	-0.42	0.833	6
Silt	Upp	-0.6	-0.5	-0.5	-0.5	-0.46	-0.45	-0.36	-0.42	0.891	6
Silt	Lul	-0.5	-0.7	-0.7	-0.6	-0.59	-0.61	-0.54	-0.58	0.930	6
Silt	Medel	-0.6	-0.5	-0.5	-0.5	-0.50	-0.50	-0.42	-0.47	0.885	6
Silt-grw	Kri	-0.5	-0.5	-0.4	-0.5	-0.23	-0.23	-0.29	-0.25	0.725	6
Silt-grw	Upp	-0.5	-0.7	-0.3	-0.5	-0.40	-0.20	-0.32	-0.31	0.775	6
Silt-grw	Lul	-0.5	-0.6	-0.6	-0.6	-0.45	-0.49	-0.48	-0.47	0.713	6
Silt-grw	Medel	-0.5	-0.6	-0.4	-0.5	-0.36	-0.31	-0.36	-0.34	0.738	6
Lera	Kri	-0.6	-0.4	-0.2	-0.4	-0.61	-0.61	-0.64	-0.62	0.984	6
Lera	Upp	-0.7	-0.5	-0.2	-0.5	-0.70	-0.70	-0.78	-0.73	0.972	6
Lera	Lul	-0.2	-0.6	-0.8	-0.5	-0.87	-0.90	-0.90	-0.89	0.956	6
Lera	Medel	-0.5	-0.5	-0.4	-0.5	-0.73	-0.74	-0.77	-0.75	0.971	6
Torv	Kri	-0.7	-0.6	-0.5	-0.6	-0.52	-0.51	-0.60	-0.54	0.941	6
Torv	Upp	-0.8	-0.7	-0.6	-0.7	-0.62	-0.54	-0.65	-0.60	0.948	6
Torv	Lul	-0.9	-0.7	-0.7	-0.8	-0.79	-0.85	-0.88	-0.84	0.924	6
Torv	Medel	-0.8	-0.7	-0.6	-0.7	-0.64	-0.63	-0.71	-0.66	0.937	6
Sand	Kri	-0.6	-0.5	-0.2	-0.4	-0.85	-0.64	-0.53	-0.67	0.876	4
Sand	Upp	-0.6	-0.6	-0.3	-0.5	-0.81	-0.88	-0.61	-0.77	0.871	4
Sand	Lul	-0.6	-0.7	-0.6	-0.6	-0.93	-1.02	-1.01	-0.99	0.961	4
Sand	Medel	-0.6	-0.6	-0.4	-0.5	-0.86	-0.85	-0.72	-0.81	0.902	4
Sand-grw	Kri	-0.7	-0.3	-0.2	-0.4	-0.32	-0.45	-0.57	-0.45	0.822	4
Sand-grw	Upp	-0.6	-0.5	-0.3	-0.5	-0.44	-0.41	-0.58	-0.48	0.823	4
Sand-grw	Lul	-0.5	-0.7	-0.5	-0.6	-0.44	-0.54	-0.71	-0.56	0.848	4
Sand-grw	Medel	-0.6	-0.5	-0.3	-0.5	-0.40	-0.47	-0.62	-0.50	0.831	4
Silt	Kri	-0.7	-0.3	-0.2	-0.4	-0.23	-0.44	-0.53	-0.40	0.797	4
Silt	Upp	-0.7	-0.6	-0.4	-0.6	-0.33	-0.37	-0.56	-0.42	0.746	4
Silt	Lul	-0.5	-0.7	-0.7	-0.6	-0.56	-0.54	-0.53	-0.54	0.871	4
Silt	Medel	-0.6	-0.5	-0.4	-0.5	-0.37	-0.45	-0.54	-0.45	0.804	4
Silt-grw	Kri	-0.5	-0.3	-0.2	-0.3	-0.31	-0.44	-0.51	-0.42	0.793	4
Silt-grw	Upp	-0.6	-0.5	-0.2	-0.4	-0.37	-0.41	-0.53	-0.44	0.712	4
Silt-grw	Lul	-0.6	-0.8	-0.7	-0.7	-0.38	-0.29	-0.36	-0.34	0.586	4
Silt-grw	Medel	-0.6	-0.5	-0.4	-0.5	-0.35	-0.38	-0.47	-0.40	0.697	4
Lera	Kri	-0.6	-0.4	-0.2	-0.4	-0.64	-0.59	-0.68	-0.64	0.954	4
Lera	Upp	-0.5	-0.5	-0.2	-0.4	-0.89	-0.65	-0.84	-0.79	0.939	4
Lera	Lul	0.0	-0.6	-0.7	-0.4	-1.05	-0.94	-1.07	-1.02	0.943	4
Lera	Medel	-0.4	-0.5	-0.4	-0.4	-0.86	-0.73	-0.86	-0.82	0.945	4
Torv	Kri	-0.6	-0.6	-0.5	-0.6	-0.64	-0.56	-0.71	-0.64	0.907	4
Torv	Upp	-0.7	-0.7	-0.4	-0.6	-0.80	-0.59	-0.82	-0.74	0.964	4
Torv	Lul	-1.0	-0.8	-0.8	-0.9	-0.69	-0.74	-0.65	-0.69	0.961	4
Torv	Medel	-0.8	-0.7	-0.6	-0.7	-0.71	-0.63	-0.73	-0.69	0.944	4

Tabell 13. Första tjälfria dag.

Jord	Ort	Intercept (dag)				Lutningar (dagm ² årM) ⁻¹				r ²	n
		kallt	median	varmt	medel	kallt	median	varmt	medel		
Sand	Kri	99	21	12	44	34.8	68.2	64.5	55.8	0.952	6
Sand	Upp	109	98	7	71	46.9	47.4	71.2	55.2	0.960	6
Sand	Lul	139	129	122	130	32.0	52.4	56.1	46.9	0.959	6
Sand	Medel	116	83	47	82	37.9	56.0	64.0	52.6	0.957	6
Sand-grw	Kri	83	-3	-1	26	49.1	72.2	63.7	61.7	0.986	6
Sand-grw	Upp	112	85	6	68	43.3	53.8	71.4	56.2	0.974	6
Sand-grw	Lul	114	118	104	112	49.4	65.7	65.0	60.1	0.954	6
Sand-grw	Medel	103	66	36	68	47.3	63.9	66.7	59.3	0.971	6
Silt	Kri	66	-12	3	19	44.8	73.0	67.1	61.6	0.954	6
Silt	Upp	112	87	1	66	44.9	54.2	73.4	57.5	0.983	6
Silt	Lul	124	127	124	125	47.7	61.4	65.9	58.3	0.954	6
Silt	Medel	100	67	43	70	45.8	62.9	68.8	59.1	0.964	6
Silt-grw	Kri	74	-16	-5	17	49.8	73.7	64.0	62.5	0.966	6
Silt-grw	Upp	109	82	2	64	50.4	56.4	76.1	61.0	0.969	6
Silt-grw	Lul	116	123	116	118	48.7	63.8	52.1	54.9	0.894	6
Silt-grw	Medel	99	62	37	66	49.6	64.7	64.1	59.5	0.943	6
Lera	Kri	96	4	0	33	39.3	69.5	64.9	57.9	0.973	6
Lera	Upp	110	88	5	68	45.9	49.9	71.1	55.6	0.982	6
Lera	Lul	111	117	131	120	49.2	63.4	54.4	55.7	0.946	6
Lera	Medel	106	70	45	74	44.8	60.9	63.5	56.4	0.967	6
Torv	Kri	177	149	75	134	44.3	53.6	86.0	61.3	0.741	6
Torv	Upp	219	190	130	180	31.9	42.7	68.1	47.5	0.629	6
Torv	Lul	244	209	203	218	31.6	48.4	53.0	44.4	0.654	6
Torv	Medel	213	183	136	177	35.9	48.2	69.0	51.1	0.674	6
Sand	Kri	94	13	-5	33	40.5	78.3	89.3	69.4	0.964	4
Sand	Upp	118	99	-7	69	36.8	46.7	95.4	59.6	0.953	4
Sand	Lul	136	139	129	135	34.7	39.4	48.6	40.9	0.966	4
Sand	Medel	116	83	38	79	37.3	54.8	77.7	56.6	0.961	4
Sand-grw	Kri	86	-9	-8	22	47.5	79.9	73.0	66.8	0.983	4
Sand-grw	Upp	115	94	-7	67	41.3	42.1	92.9	58.8	0.969	4
Sand-grw	Lul	123	121	108	117	39.7	57.1	60.9	52.5	0.926	4
Sand-grw	Medel	108	68	30	69	42.8	59.7	75.6	59.4	0.959	4
Silt	Kri	82	-12	-6	21	26.5	72.9	80.9	60.1	0.890	4
Silt	Upp	115	94	-2	69	41.4	45.8	77.7	54.9	0.962	4
Silt	Lul	133	133	133	133	37.1	50.9	48.1	45.3	0.978	4
Silt	Medel	110	71	41	74	35.0	56.5	68.9	53.5	0.943	4
Silt-grw	Kri	84	-6	-11	22	40.0	60.7	70.1	56.9	0.915	4
Silt-grw	Upp	114	92	-6	66	40.5	42.4	89.9	57.6	0.960	4
Silt-grw	Lul	129	127	123	126	32.7	54.6	45.2	44.2	0.908	4
Silt-grw	Medel	109	71	35	71	37.8	52.6	68.4	52.9	0.928	4
Lera	Kri	104	-8	-9	28	30.4	83.9	77.2	63.8	0.968	4
Lera	Upp	116	96	-6	68	37.9	36.8	92.3	55.7	0.976	4
Lera	Lul	122	125	140	129	37.2	49.8	41.0	42.7	0.923	4
Lera	Medel	114	71	41	75	35.2	56.8	70.2	54.1	0.956	4
Torv	Kri	155	110	30	98	70.4	100.6	146.5	105.9	0.898	4
Torv	Upp	181	153	88	141	77.8	92.2	130.3	100.1	0.839	4
Torv	Lul	234	187	183	201	48.2	84.7	87.7	73.5	0.785	4
Torv	Medel	190	150	100	147	65.5	92.5	121.5	93.2	0.841	4



**Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 820602-3 från Statens råd
för byggnadsforskning till Institutionen för markvetenskap,
Avdelningen för marklära, Sveriges Lantbruksuniversitet, Uppsala.**

R50:1984

ISBN 91-540-4124-4

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

Art.Nr: 6704050

**Abonnemangsgrupp:
W. Installationer**

**Distribution:
Svensk Byggtjänst, Box 7853
103 99 Stockholm**

Cirkapris: 35 kr exkl moms