



CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

GEOHYDROLOGISKA FORSKNINGSGRUPPEN

Geologi

Geoteknik med grundläggning

Vattenbyggnad

Vattenförsörjnings - och avloppsteknik

ISSN 0437 - 8165

TERMISK REGISTRERING ,
EN METOD ATT KARTERA MARKVATTENHALT -
- Termovisionsförsök i klimatkammare

LARS O. ERICSSON

STIG HÅRD



CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

GEOHYDROLOGISKA FORSKNINGSGRUPPEN

Geologi

Geoteknik med grundläggning

Vattenbyggnad

Vattenförsörjnings - och avloppsteknik

ISSN 0437 - 8165

TERMISK REGISTRERING ,
EN METOD ATT KARTERA MARKVATTENHALT -
- Termovisionsförsök i klimatkammare

Adress:

Geohydrologiska forskningsgruppen
Chalmers Tekniska Högskola
412 96 GÖTEBORG Tel. 031-810100

LARS O. ERICSSON

STIG HÅRD

INNEHÅLL	SID
FÖRORD	
INNEHÅLLSFÖRTECKNING	
FIGURFÖRTECKNING	
TABELLFÖRTECKNING	
BILAGEFÖRTECKNING	
SAMMANFATTNING	
1. BAKGRUND	1
1.1 Fjärranalys för bestämning av vattenhalt	1
1.2 Forskningsområden	2
1.3 Exempel på fjärranalysförsök	3
2. MÅLSÄTTNING	7
3. ENERGIUTBYTE VID MARKYTAN OCH MARKENS TERMISKA EGENSKAPER	8
4. FÖRSÖKSBESEKRVNING - ÖVERSIKT	17
4.1 Princip	17
4.2 Förberedelser innan försök	18
4.3 Dokumentation efter försök	20
5. TEKNISKA DATA	21
5.1 Klimatkammare	21
5.2 Termovisionsutrustning	22
5.3 Temperaturmätningar	23
6. JORDARTER	25
6.1 Mekanisk sammansättning	25
6.2 Emission	26
7. TERMOVISIONSREGISTRERING	28
7.1 Princip	28
7.2 Utvärdering	28
7.3 Utförande	29
7.4 Störningar - felkällor	31

	SID
8. FÖRSÖKSBESKRIVNINGAR - EXEMPEL OCH RESULTAT	32
8.1 Simulerade utströmningsförsök	32
8.2 Simulerad dygnsamplitud, stora behållare med olika grundvattennivåer	36
8.3 Simulerad dygnsamplitud, små behållare med olika vattenhalt	43
9. JÄMFÖRELSE MELLAN TEMPERATURMÄTNING MED TERMOVISIONSKAMERA OCH TERMOMETRAR	50
10. RESULTATSAMMANFATTNING OCH DISKUSSION	53
11. REFERENSER	59
12. BILAGOR	
Kalibreringsdiagram för termovisionskamera	61
Exempel på temperaturkurvor	62-63

FIGURFÖRTECKNING

- Figur 1 Det elektromagnetiska spektrat.
- Figur 2 Yttemperaturen för två behållare med sand. Den ena behållaren vattenmättades den 29 augusti. Den 7 september är vattenhalten lika i behållarna för de översta 10 centimetrarna. Den uppmätta temperaturskillnaden speglar vattenhaltsvariationer på större djup (Blanchard et.al. 1974).
- Figur 3 Dygnsamplitudens (ΔT) variation beroende på vattenhalten (Blanchard et.al. 1974, efter Schmutge och Jackson, 1974).
- Figur 4 Termografiskt registrerade temperaturer 8 april 1974 kl 00.15 korrelerade med volymetrisk markvattenhalt i intervallet 0.6 cm (Lundén 1977).
- Figur 5 Värmebalansens faktorer vid markytan (efter Stenberg, 1977).
- Figur 6 Faktorer i strålningsbalansen (efter Stenberg, 1977).
- Figur 7 Reflektansen som funktion av våglängd vid varierande fuktighetshalt (Fitzgerald, 1974).
- Figur 8 Atmosfärens absorption. Vissa våglängder transmitteras (passerar genom) sk infraröda fönster. Bandbredden för två versioner av termovisionskamera har markerats.
- Figur 9 Principen för värmeöverföring i de flesta typer av mark, Modin (1979, efter Johansen 1975).
1. Ledning i jordpartiklar och vätska
 2. Ledning i luft
 3. Strålning från partikel till partikel
 4. Diffusion av ånga
 5. Konvektion i luft

- Figur 10 De olika värmeöverföringsmekanismerna beroende av jordens textur och mätnadsgrad. De streckade linjerna visar den variation för mätnadsgraden som kan förväntas i fält.
1. Termisk fördelning av fukt
 2. Ångdiffusion på grund av fuktfördelningen
 3. Fri konvektion i vatten
 4. Fri konvektion i luft
 5. Strålning
- Modin (1979, efter Johansen 1975)
- Figur 11 Värmeledningsförmågan för en sandig jordart med kvartshalten 0.95 och varierande vattenhalt.
- Figur 12 Specifik värmekapacitet som funktion av torr- densitet och vattenhalt (vattenmätnadsgrad, S = porositet).
- Figur 13 Temperaturledningsförmågan som funktion av vattenmätnadsgraden för en jordart med viss torrdensitet, porositet och kvartshalten 0.95.
- Figur 14 Nivåkärl anslutna till provbehållare för konstant grundvattenyta.
- Figur 15 Temperaturmätning med termometer, stor behållare.
- Figur 16 Temperaturmätning med termoelement, små behållare.
- Figur 17 Klimatkammare
- Figur 18 Termovisionsutrustning (AGA, 1974).
- Figur 19 Kornstorleksfördelning för den filtersand som användes vid försöken (Ahlseil IR, 1978).
- Figur 20 Emissionens variation med vattenhalten.

- Figur 21 Exempel på isoterskillnaden (Δ_{iOr}) mellan referens och registrerat objekt, stor behållare. $\Delta_{iOr} = 5(0.29 - 0.46) = -0.85$. Det registrerade objektet har alltså en isothermnivå som är 0,85 enheter lägre jämfört med referensen.
- Figur 22 Exempel på isoterskillnaden (Δ_{iOr}) mellan små behållare med olika vattenhalt. Referensen har lagts på den torra behållaren (1) överst till vänster, avsökningen av de övriga behållarna har påbörjats. I figuren ovan har den andra isotermen lagts på behållare 9 nederst till höger, där full yttäckning ännu ej har erhållits. Behållare 7 och 8 som är något varmare börjar också framträda på bilden. Isoterskillnaden (Δ_{iOr}) kan på bilden framräknas till $5(0.03 - 0.45) = -2.10$ men är i själva verket något lägre eftersom full yttäckning ej ännu erhållits för behållare 9.
- Figur 23 Principskiss, utströmningsförsök.
- Figur 24 Termovisionsförsök i klimatkammare, utströmningsförsök.
- Figur 25 Yttemperaturens variation beroende på bräddnivå. Försök 1.
- Figur 26 Yttemperaturens variation beroende på bräddnivå. Försök 2.
- Figur 27 Temperaturamplituden plottad mot uppmätt grundvattennivå, behållare 7-10 samt behållare 1 (torr) vid försök med simulerad dygnsamplitud och konstanta grundvattennivåer.
- Figur 28 Temperaturamplituden plottad mot vattenhalten (0-5 cm), behållare 7-10 samt behållare 1 (torr), vid försök med simulerad dygnsamplitud och konstanta grundvattennivåer.

- Figur 29 Maximal temperatur plottad mot vattenhalten (0-5 cm) för behållare 7-10 samt behållare 1 (torr), vid försök med simulerad dygnsamplitud och konstanta grundvattennivåer. Den maximala lufttemperaturen var 33.5°C .
- Figur 30 Temperaturkurvor (termoelement) vid försök med simulerad dygnsamplitud och konstanta grundvattennivåer (behållare 7-10).
- Figur 31 Temperaturkurvor (termometrar), vid försök med simulerad dygnsamplitud och konstanta grundvattennivåer (behållare 7-10).
- Figur 32 Maximitemperatur och sluttemperatur för jordarter med olika vattenhalt vid försök med simulerad dygnsamplitud.
- Figur 33 Temperaturamplituden för jordarter med olika vattenhalt vid försök med simulerad dygnsamplitud.
- Figur 34 Isoternivåer och isoterskillnader för jordarter med olika vattenhalt (behållare 1-9, behållare 1 överst till vänster är torr, behållare 9 nederst till höger är fuktigast) vid försök med simulerad dygnsamplitud.
- Figur 35 Beräknad skenbar temperatur (I_{\circ}) efter termovisionsregistrering för jordarter med olika vattenhalt vid försök med simulerad dygnsamplitud.
- Figur 36 Jämförelse mellan beräknad skenbar temperatur a-c (I_{\circ}) från termovisionsmätning och uppmätt temperatur (termometer) för jordarter med olika vattenhalt och simulerad dygnsamplitud.
- Figur 37 Jämförelse mellan beräknad skenbar temperatur a-b (I_{\circ}) från termovisionsmätning och uppmätt temperatur (termometer) för jordarter med olika vattenhalt och simulerad dygnsamplitud.

TABELLFÖRTECKNING

- Tabell 1 Data, klimatkammare
- Tabell 2 Förhållandet mellan emission (8-13 μm) hos sand och volymetrisk vattenhalt i jordens översta 25 cm (Lundén 1977, efter Fuchs & Tanner, 1968).
- Tabell 3 Uppmätt temperatur vid utströmningsförsök 1 och beräknad skenbar temperatur (I_0) från termovisionsregistrering.
- Tabell 4 Uppmätt temperatur och vattenhalt vid utströmningsförsök 2 samt beräknad skenbar temperatur (I_0) från termovisionsregistrering.
- Tabell 5 Uppmätt temperatur, vattenhalt och luftfuktighet vid försök med simulerad dygnsamplitud och konstanta grundvattennivåer.
- Tabell 6 Registrerade isotermnivåer och utvärderade isotermkillnader (Δ_{i0r}) vid försök med simulerad dygnsamplitud och konstanta grundvattennivåer.
- Tabell 7 Beräknad skenbar temperatur (I_0) vid försök med simulerad dygnsamplitud och konstanta grundvattennivåer.
- Tabell 8 Temperaturdata och vattenhalter uppmätta vid försök med simulerad dygnsamplitud, små behållare, jordarter med olika vattenhalt.
- Tabell 9 Inbördes gradering av jordarter med olika vattenhalt efter A, isotermnivå och B, temperaturmätning med termoelement vid försök med simulerad dygnsamplitud.
- Tabell 10 Uppmätta isotermnivåer för jordarter med olika vattenhalt vid försök med simulerad dygnsamplitud.

BILAGEFÖRTECKNING

- Bilaga 1 Kalibreringskurva för omvandling av isotherm-
enheter till °C och omvänt.
- Bilaga 2 Exempel på plottade temperaturkurvor från
klimatkammarförsök, simulerad dygnsamplitud.

SAMMANFATTNING

De genomförda klimatkammarförsöken har sammanfattningsvis visat att:

- o små temperaturskillnader kan mätas på jordarter med termovisionskameran
- o Korrelationen mellan konventionella temperaturmätningar och beräkningar från isotermnivåer uppmätta med termovisionskameran är god
- o temperaturamplituden ökar vid låga vattenhalter in- till ett visst värde, för att sedan minska med ytterligare ökande vattenhalt. Temperaturledningsförmågan för en jordart följer samma förlopp i relation till vattenhalten. Det är mycket sannolikt att temperaturamplituden respektive maximumtemperaturen är direkt proportionell mot temperaturledningsförmågan. Detta samband är principiellt viktigt, då det ej redovisats i den internationella litteraturen
- o simulerade utströmningsområden har kunnat urskiljas även fast temperaturskillnaden mellan "grundvattnet" och omgivningen varit relativt liten (3-5°C)
- o termovisionskameran har detekterat temperaturskillnader som orsakas av vattenomsättning från minst 10 cm djup
- o behållare med olika vattenhalt har kunnat skiljas från varandra genom variationer i yttemperatur. Korrelationen till vattenhalt kan göras genom att mäta dygnsamplitud eller maximumtemperatur
- o temperaturmätningar på marken är svåra att göra. En systematisk temperaturdifferens föreligger mellan termometrar och termoelement vid de genomförda klimatkammarförsöken. Termoelementens placering, dvs nivå under markytan och kornkontakt har stor betydelse vid temperaturmätningen. Eftersom referenstemperaturen uppmättes med termoelement eller termometer föreligger

en viss osäkerhet vid utvärderingen av vilka temperaturer som termovisionsbilderna representerar.

- o Temperaturfördelningen i klimatkammaren var inte jämn. Temperaturen varierade något både vertikalt och horisontellt, vilket kan ha betydelse vid jämförelse mellan de olika behållarna.

De genomförda klimatkammarförsöken har inte resulterat i en direkt användbar metod för kartering av markvattenhalt. De resultat som hittills framkommit visar emellertid att det praktiskt borde vara möjligt att:

- o lokalisera utströmningsområden på naturmark
- o lokalisera utströmningsområden i vatten
- o urskilja vattenhaltsvariationer på homogena ytor
- o det torde också vara möjligt att lokalisera läckor på ledningssystem om temperaturskillnaden mellan utläckande vätska och omgivningen är tillräckligt stor. En förutsättning är dock att ej för stora termiska störningar finns nära läckagepunkten.

De genomförda klimatkammarförsöken visar också att en rad problem föreligger innan metoden till fullo kan utnyttjas, dessutom har inte alla frågeställningar kunnat belysas.

Vanligast har varit att utnyttja strålning med våglängder mellan 0.4-15 μm , figur 1. Våglängdsintervallet 0.4-1.0 μm innehåller huvudsakligen reflekterad strålning, i första hand solstrålning medan intervallet 2.0-15 μm utgörs av den emitterade värmestrålningen, inom det infraröda området. Inom detta våglängdsområde har ett flertal undersökningar genomförts för att bestämma markvattenhaltsvariationer. En av anledningarna till att lovande resultat har erhållits just inom det infraröda spektralområdet kan vara att orsakerna till strålningsförändringarna lättare har kunnat bestämmas inom denna del av det elektromagnetiska spektrat.

Vissa försök har även utförts inom mikrovågsområdet (10^3 - 10^6 μm). Registreringar inom detta område ger dock dålig upplösning och penetrationen i markprofilen är ej tillräcklig.

Jordarters temperatur kan mätas med termometrar, termoelement och andra instrument. Fjärranalys, registrering av den emitterade infraröda strålningen är också ett sätt att mäta temperatur. Fjärranalys för bestämning av vattenhalt avser sålunda att mäta jordarternas yttemperatur och korrelera temperaturvariationer med jordarternas termiska egenskaper, varav vatten utgör en mycket betydelsefull faktor.

Temperaturmätningar som görs med fjärranalysmetoder ger inte den verkliga temperaturen eftersom jordarten har en emission som är mindre än för en svart kropp. De uppmätta temperaturerna är lägre än de verkliga. De temperaturförändringar som registreras är dock av samma storleksordning som den verkliga förändringen.

1.2 Forskningsområden

Ursprungligen utnyttjades fjärranalysteknik främst inom den militära sektorn men successivt har tekniken blivit tillgänglig även för civilt bruk. Mätning av jordarters vattenhalt med hjälp av fjärranalysmetoder pågår för närvarande inom ett flertal forskningsområden. Exempel på områden där främst vattenhaltsvariationer är av intresse är skogs- och

jordbruk, ingenjörsgéologi omfattande t ex släntstabilitet och skredproblematik, flygbildstolkning, vegetationskartering samt meteorologi. Denna rapport avser att belysa möjligheterna att med termovisionskamera kartera markvatthalt samt att lokalisera in- och utströmningsområden för grundvatten.

1.3 Exempel på fjärranalysförsök

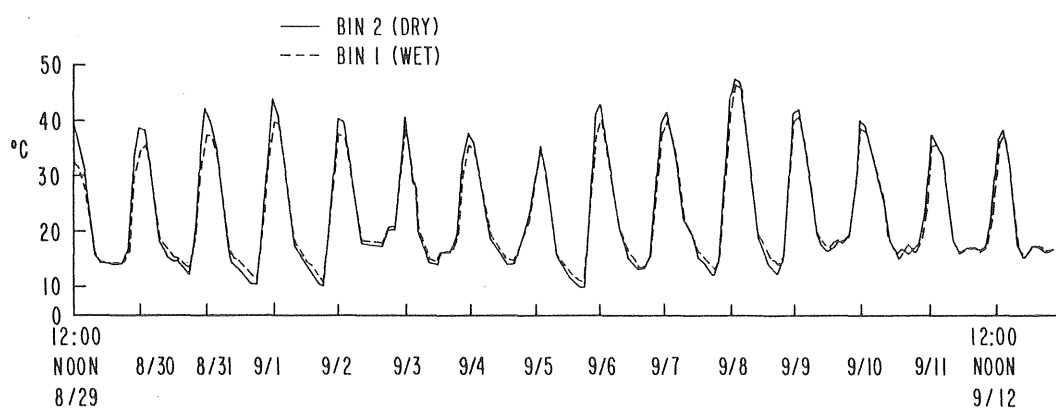
Greeley et.al. (1974) har studerat markvatthaltsvariationer i samband med skred med fjärranalysteknik. Försök pågår även i Sverige inom detta område. Statens Geotekniska Institut (SGI) har undersökt skredfarliga områden i Götaälvdalen med motsvarande teknik. I USA avser Ames Research Center och U.S. Army Corps att kombinera fjärranalysteknik och konventionell ingenjörsgéologi för att klarlägga släntstabilitet i kustnära områden.

Adams (et.al. 1970) har lokaliserat utströmmande grundvatten i havet, längs kusten på Hawaii med hjälp av termisk registrering. Försöket utfördes med AGA:s termovisionssystem från en höjd av 3 400 m. Vid registreringen kunde termiska anomalier identifieras och konnekteras med utläckande grundvatten.

Christensen (1974) sammanfattar tyska undersökningar där fjärranalys bl a har använts för att spåra underjordiska bränder och långsamt strömmande källvatten under kall och varm årstid, då vattentemperaturen avviker från jordtemperaturen.

Myers och Heilman (1969) visade att det förelåg en temperaturskillnad mellan delytor med olika vattnehalt inom samma jordart. På dagen var den våtare ytan kallare och på natten varmare än den torrare ytan. Vid ett försök som genomfördes var en yta med vattnehalt 27 vikts% 9°C varmare jämfört med en yta med vattnehalt 33 vikts%. Försök vid Ames Research Center har visat att små temperaturskillnader i sandiga jordarter orsakas av vattnehaltvariationer

på större djup än 10 cm. Vid försöken användes två behållare fyllda med sand. Termoelement i ytan registrerade temperaturen. En behållare vattenmättades. Behållaren placerades utomhus i 2 veckor under ideala väderförhållanden. Figur 2 visar medeltemperaturen plottad mot tiden. Efter en vecka var vattenhalten lika på nivån 0-10 cm i de båda behållarna (ca 1 vikts% på nivån 0-5 cm och ca 2 vikts% på nivån 5-10 cm). Trots detta uppmättes små temperaturdifferenser (2-3°C under dagen och 1°C på natten) vid den termiska registreringen. Temperaturskillnaden avspeglar vattenhaltsvariationer på större djup i jordarten.



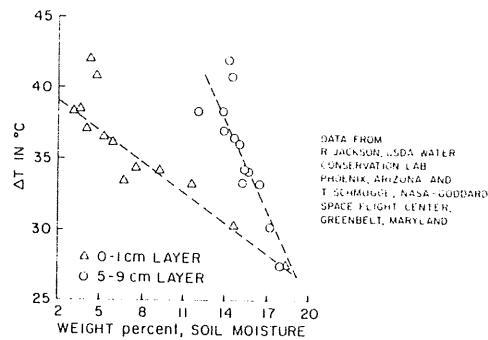
KEY: (1) EACH DATA POINT REPRESENTS MEAN OF 5 MEASUREMENTS
 (2) BIN No. 1 WAS SATURATED WITH WATER ON 8-29-73
 (3) TOP 10cm OF SAND HAD SAME MOISTURE CONTENT ON 9-7-73

Figur 2 Yttertemperaturen för två behållare med sand. Den ena behållaren vattenmättades den 29 augusti. Den 7 september är vattenhalten lika i behållarna för de översta 10 centimetrarna. Den uppmätta temperaturskillnaden speglar vattenhaltsvariationer på större djup. (Blanchard et.al. 1974.)

Blanchard et.al. (1974) efter Jackson och Schmutge (1974) visar också att dygnsamplituden minskar med ökande vattenhalt, figur 3. Korrelationen mellan temperatur och vattenhalt anses vara möjlig beroende på att vattenhaltsvariationer förändrar jordens egenskaper med avseende på värmeöverföring.

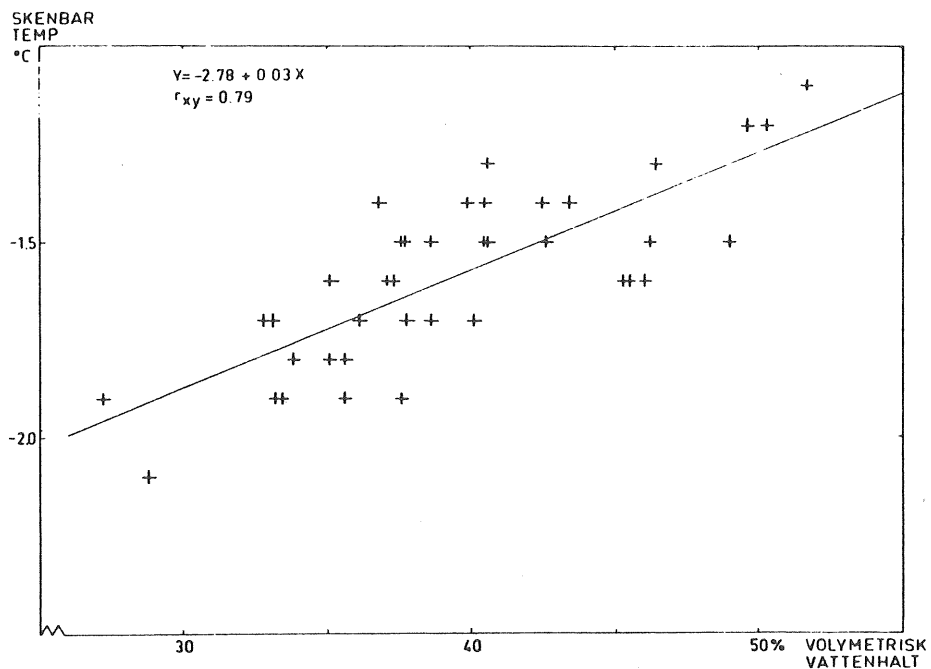
Idso (1975) redovisar olika möjligheter att korrelera vattenhalten med hjälp av fjärranalysteknik och markfysi-

kaliska mätningar, se vidare (Ericsson, Holmstrand, 1978).



Figur 3 Dygnsamplitudens (ΔT) variation beroende på vattenhalten (Blanchard et.al. 1974, efter Schmugge och Jackson, 1974).

Lundén (1977) redovisar försöksregistreringar med SMHI:s IR-svepfotometer över Vibydalen. I samband med registreringarna, som utfördes på olika höjd, togs jordprover för analys av vattenhalt, kornstorlek och humushalt från 42 platser inom området. Marktemperaturen uppmättes på samtliga platser.



Figur 4 Termografiskt registrerade temperaturer 8 april kl. 00.15 korrelerade ned volymetrisk markvattenhalt i intervallet 0.6 cm (Lundén 1977).

Försöken visar att det finns relativt goda möjligheter att utnyttja IR-termografi för kartering av markvattenhalt. Bäst förutsättningar föreligger under natten då värmeflödet i marken är uppåtriktat (nattregistrering). Figur 4 redovisar uppmätt skenbar temperatur korrelerade med volymetrisk vattenhalt.

Termografering har utförts med flygburen iR-scanner över Göta älvs dalgång (Viberg 1980). Flyghöjden var ca 1000 m. Registreringen utfördes 78-08-23 dels på eftermiddagen, dels på kvällen. Kvällsregistreringen gav de bästa tolkningsmöjligheterna. En regional tolkning av Göta älvs ytvatten har gett god överensstämmelse mellan kallare ytvatten och älvbotten bestående av berg och morän där grundvatten förväntas "strömma" ut. Över land har några utströmningsområden kunna urskiljas. Vegetationen försvårade dock tolkningen av termobilderna. Problemet bedöms kunna undvikas genom att välja ett så tidigt registreringstillfälle som möjligt inom den varma årstiden.

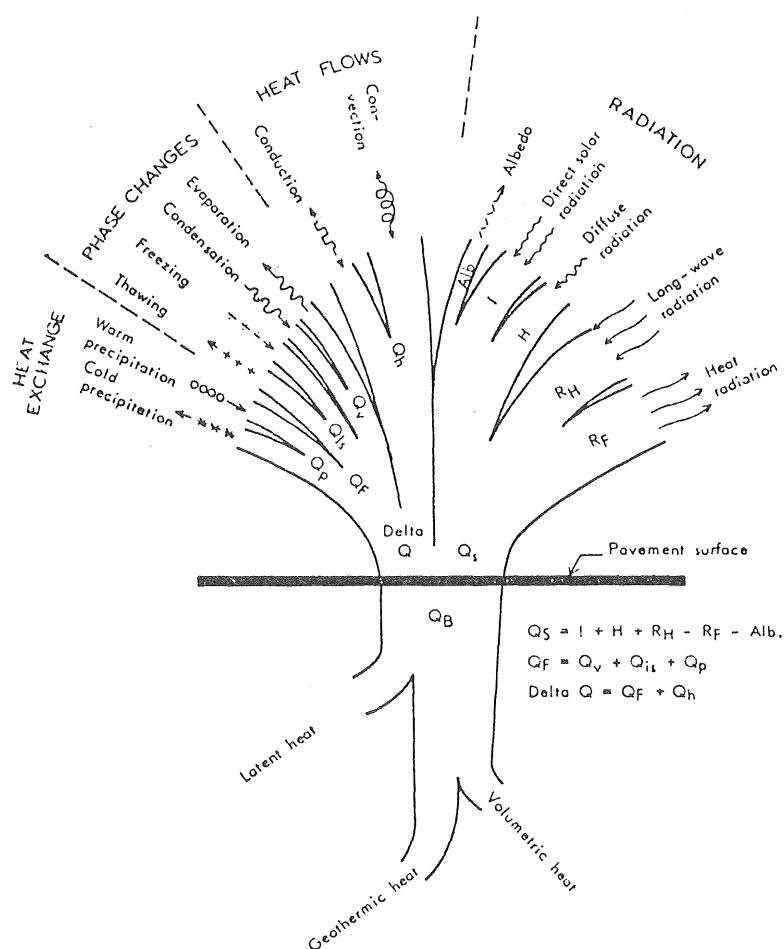
Ursprungligen var avsikten att genomföra både klimatkammarförsök under kontrollerade förhållanden och kolonnförsök i fält samt registreringar på naturliga ytor i fält. Projektet förutsattes löpa under en tvåårsperiod. Målsättningen var:

- o att genom termiska registreringar (termovisionssystem med spektralområdet 2-5,6 μm) skilja ut och avgränsa områden med olika vattenhalt.
- o att ge underlag för en undersökningsmetod för att lokalisera infiltrationsytor samt in- och utströmningsområden för grundvatten.

Efter diskussioner med BFR och Geohydrologiska forskningsgruppens referensgrupp erhöles ett mindre anslag under det första budgetåret. Därvid beslöts att enbart genomföra klimatkammarförsöken och därefter avgöra projektets vidare inriktning.

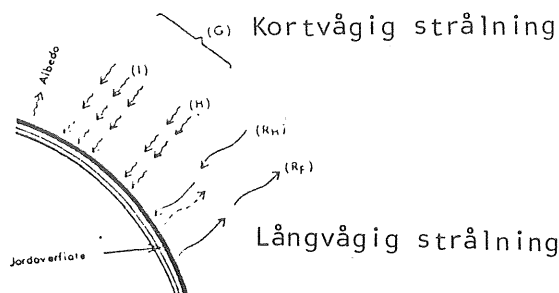
3. ENERGIUTBYTE VID MARKYTAN OCH MARKENS TERMISKA EGENSKAPER

Markytan är det gränsskikt mot atmosfären där strålningsenergi omvandlas till värmeenergi eller också råder det omvända förhållandet. Vid detta gränsskikt förekommer även ett värmeutbyte mellan fast fas och luft eller ett utbyte via förångning och kondensation. Vidare sker ett värmeutbyte genom nederbörden (Stenberg, 1977). I figur 5 illustreras värmebalansens olika faktorer och det framgår därvid att strålningen utgör en väsentlig del av den totala energiomsättningen vid markytan. Detta påverkar i stor utsträckning yttemperaturen. Det är både lång- och kortvågig strålningsenergi som träffar markytan. Figur 5 åskådliggör även de inbördes storleksordningarna mellan de olika energibärande faktorerna.



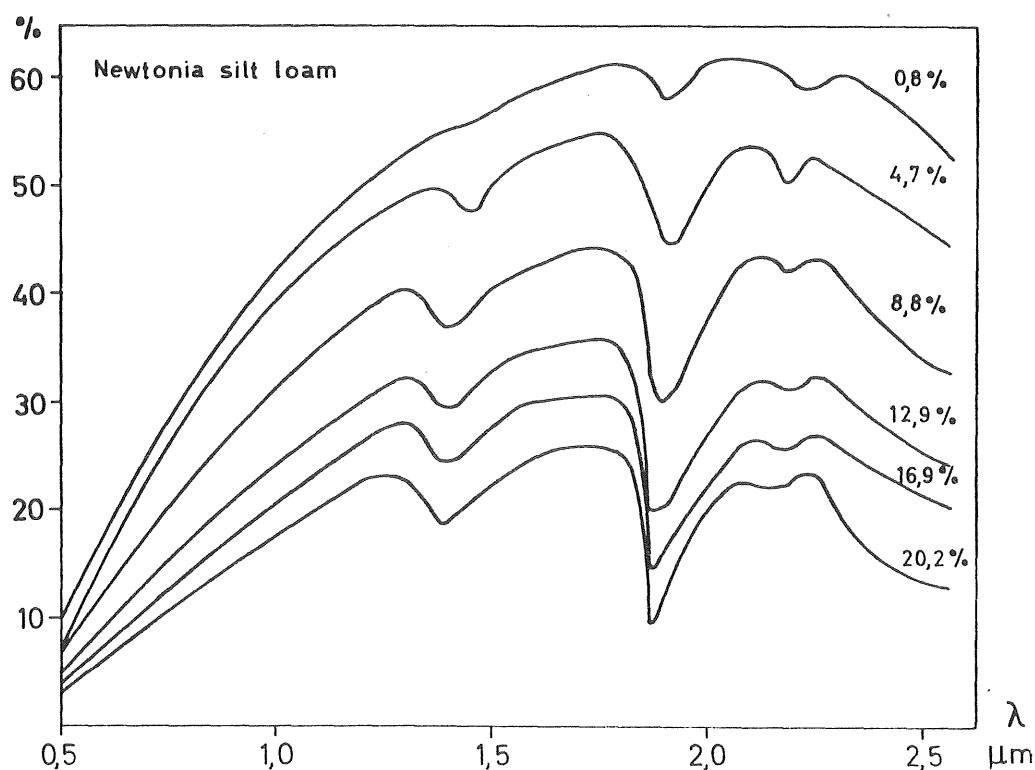
Figur 5. Värmebalansens faktorer vid markytan (efter Stenberg, 1977).

Den totala strålningen mot markytan är summan av all infallande kortvågig (mindre än $\sim 4,0 \mu\text{m}$) och långvågig strålning. Strålningsbalansen uttrycker skillnaden mellan den infallande och utgående strålningen, se figur 6.



Figur 6. Faktorer i strålningsbalansen (efter Stenberg, 1977).

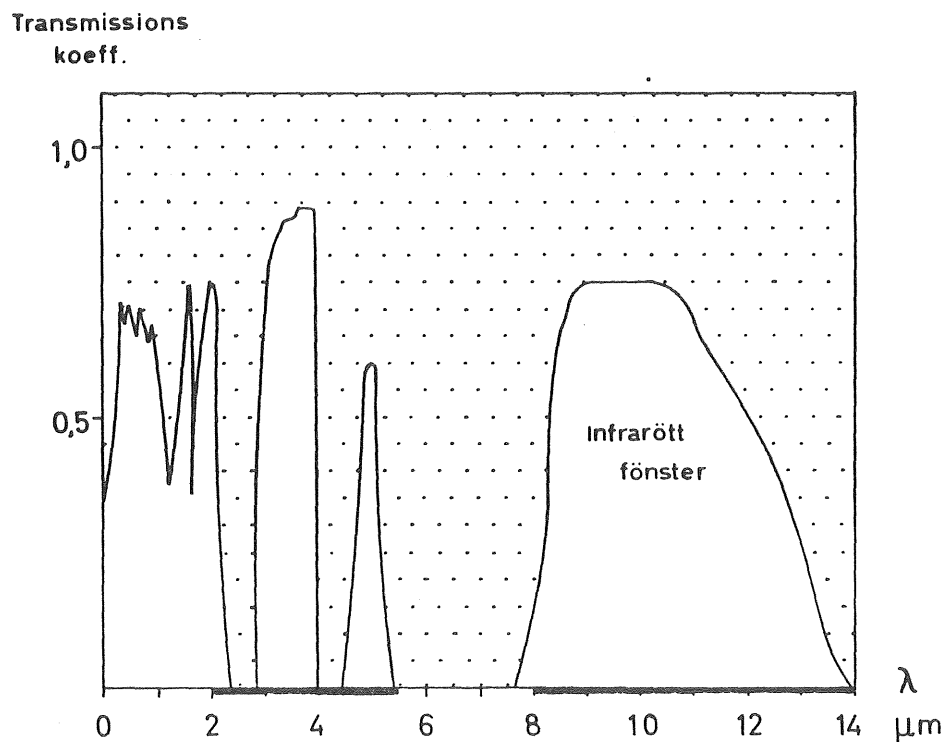
Av den inkommande strålningen absorberar ozon och syre i atmosfären de våglängder som är kortare än $0,3 \mu\text{m}$ i den ultravioletta delen av spektrat. En viss del av strålningen som träffar markytan reflekteras. Reflektionsförmågan eller albedo är olika för olika våglängder och olika ytor. Denna skillnad i reflektionsförmåga har använts vid vattenhaltsmätningar i jordarter. De våglängder som varit aktuella har legat mellan ca $0,5 \mu\text{m} - 2,5 \mu\text{m}$ i den kortvågiga delen av spektrat. I figur 7 visas reflektansen (reflekterad



Figur 7. Reflektansen som funktion av våglängd vid varierande fuktighetshalt (Fitzgerald, 1974).

strålning/infallande strålning) som funktion av våglängden vid varierande vattenhalt (Fitzgerald, 1974).

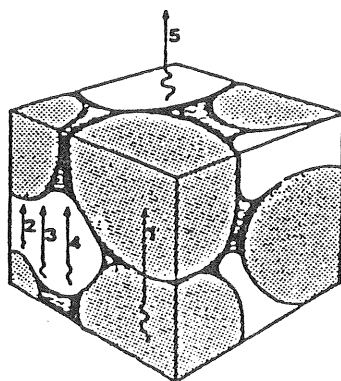
Vattenånga och koldioxid CO_2 har flera absorptionsband inom den långvågiga infraröda delen av strålningsspektrat. Denna absorption innebär en uppvärmning av luften. Det finns emellertid vissa sk fönster inom den infraröda delen där specifika våglängder passerar till jordytan. Termovisionskameran arbetar delvis med sådana våglängder (2-5,6 μm), varför den använts i detta försök, figur 8. Dessutom finns även en termovisionsutrustning tillgänglig som täcker spektralområdet 8-14 μm . Den absorberade långvågiga strålningen återstrålas mer eller mindre. Denna förmåga att delvis återstråla den långvågiga strålningen kallas för emissionsförmåga. Nettostrålningen är skillnaden mellan absorberad och emitterad strålning. Nettostrålningen är positiv under dagen och negativ under natten.



Figur 8. Atmosfärens absorption. Vissa våglängder transmittteras (passerar igenom) sk infraröda fönster. Bandbredden för två versioner av termovisionskamera har markerats.

Variationer i markens ytttemperatur orsakas både av yttre och inre faktorer. Exempel på yttre faktorer som kan variera även inom begränsade områden är vegetation, topografiskt läge, markytans lutning och struktur samt dess reflektionsegenskaper (Lundén 1977). Det är möjligt att göra korrektioner för att minska de yttre faktorernas variation med avseende på ytttemperaturen. Exempel på dylika korrektioner är, mikroklimatisk landskapsanalys och matematiska modeller för analys av yttre faktorerers påverkan med utgångspunkt från grundläggande fysikaliska lagar.

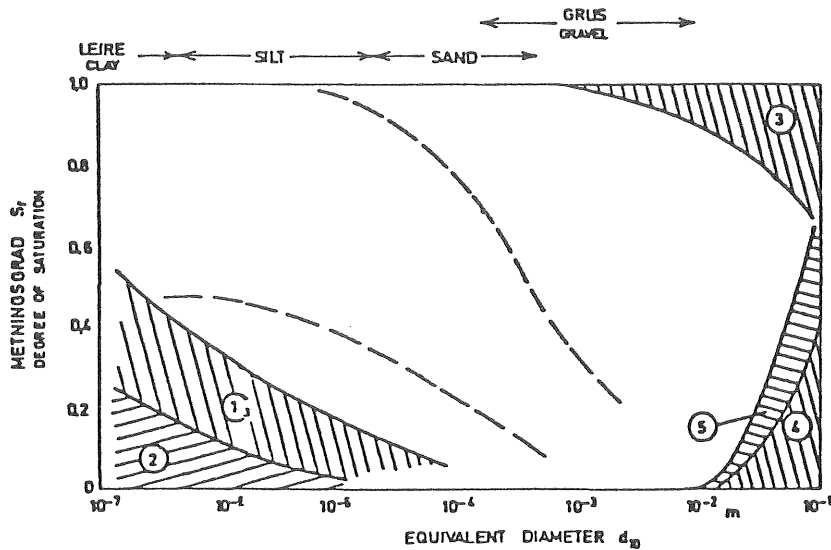
En rad inre faktorer inverkar på värmeöverföringen i en jordart. Värmeflödet i en jordart sker på olika sätt beroende på dess sammansättning, kornstorlek, kornkontakt, mineralinnehåll samt fukthalt. Figur 9 visar efter vilka principer värmeöverföring sker.



Figur 9. Principen för värmeöverföring i de flesta typer av mark, Modin (1979. efter Johansen 1975).

1. Ledning i jordpartiklar och vätska
2. Ledning i luft
3. Strålning från partikel till partikel
4. Diffusion av ånga
5. Konvektion i luft

De olika mekanismerna är i sin tur beroende av jordartens textur och mättnadsgrad, figur 10.



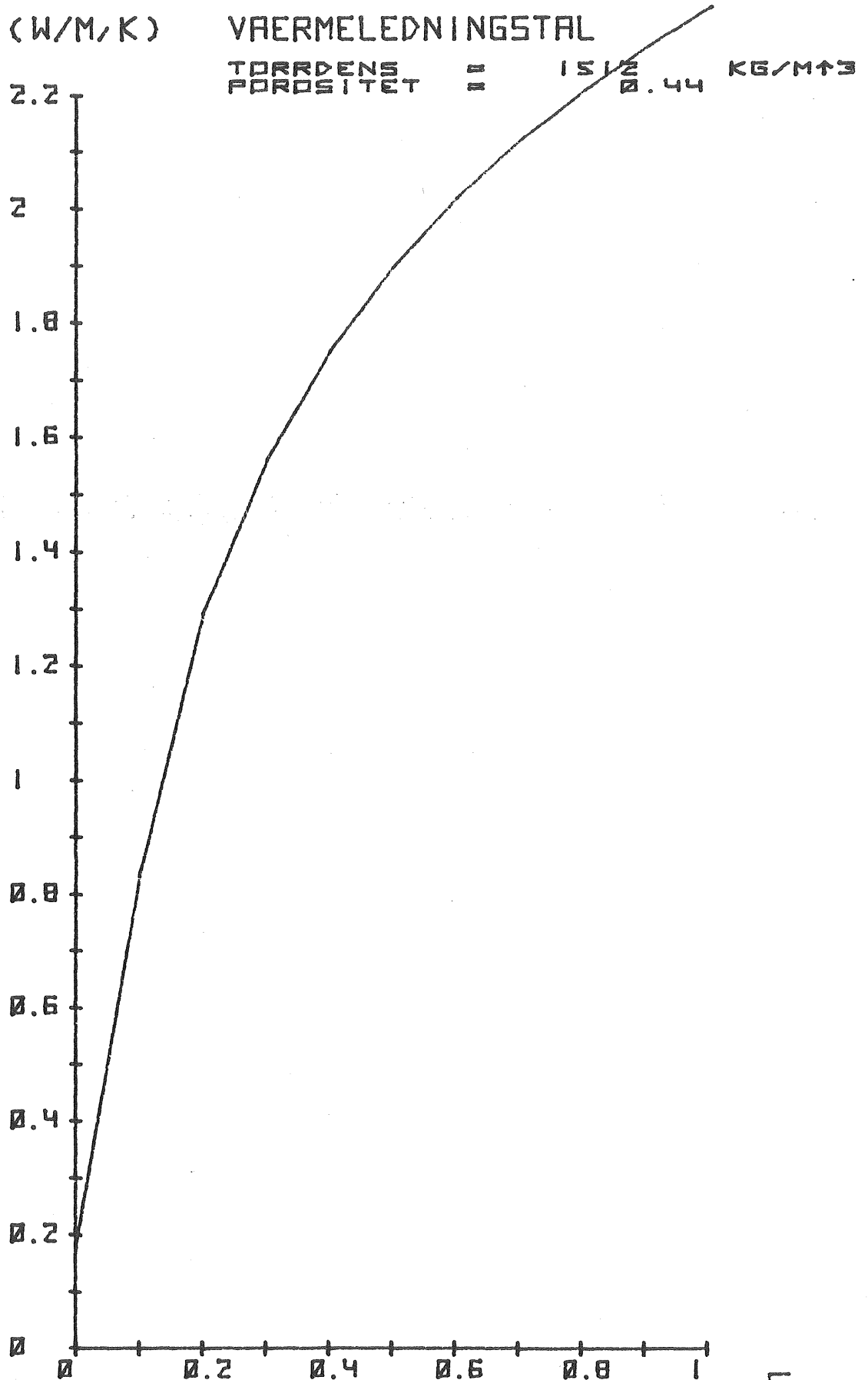
Figur 10. De olika värmeöverföringsmekanismerna beroende av jordens textur och mättnadsgrad. De streckade linjerna visar den variation för mättnadsgraden som kan förväntas i fält.

1. Termisk fördelning av fukt
2. Ångdiffusion på grund av fuktfördelningen
3. Fri konvektion i vatten
4. Fri konvektion i luft
5. Strålning

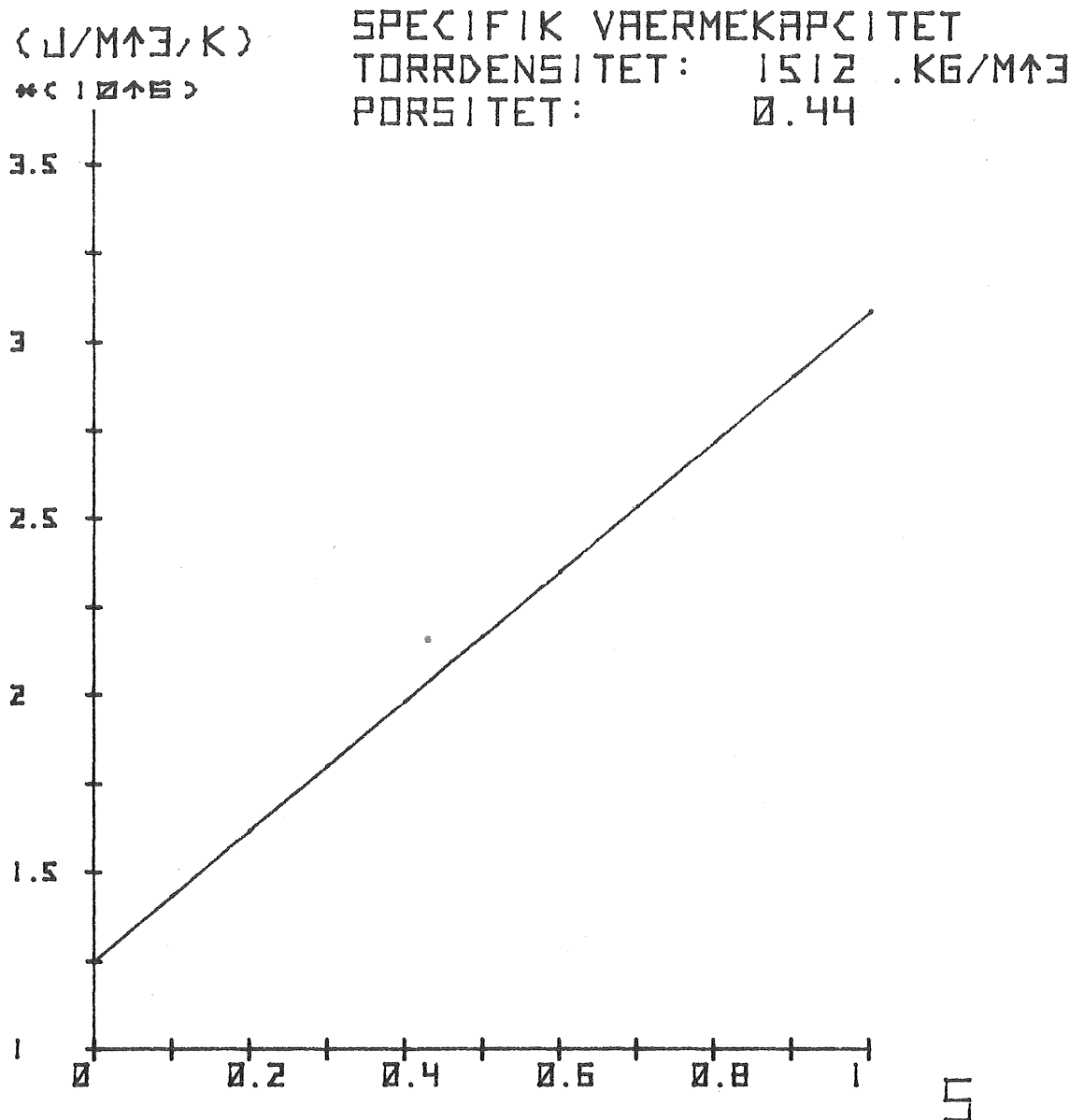
Modin (1973, efter Johansen 1975).

Värmeledningsförmågan λ ($\text{W/m, } ^\circ\text{C}$) definieras som den värmemängd som vid stationära förhållanden per tidsenhet passerar en ytenhet av ett homogent material med en längdenhets tjocklek. Temperaturskillnaden är $1\ ^\circ\text{C}$. För en jordart beror värmeledningsförmågan eller konduktiviteten av vattenhalten, se figur 11.

Specifika värmekapaciteten c ($\text{J/kg, } ^\circ\text{C}$) för ett visst material är den värmemängd som erfordras att höja temperaturen $1\ ^\circ\text{C}$ per viktsenhet. För en jordart är den mineralogiska sammansättningen betydelsefull. Vidare föreligger ett vattenhaltsberoende, se figur 12.



Figur 11. Värmeledningsförmågan för en sandig jordart med kvartshalten 0.95 och varierande vattenhalt.



Figur 12. Specifik värmekapacitet som funktion av torrdensitet och vattenhalt (vattenmättnadsgrad)

För icke-stationära förhållanden råder:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right)$$

där t = tiden, T = temperaturen och x, y, z = axlar i tre vinkelräta riktningar.

Vid stationärt tillstånd är:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = 0$$

Vid endimensionellt värmefflöde erhålls:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0$$

Temperaturledningstalet κ eller diffusiviteten definieras som:

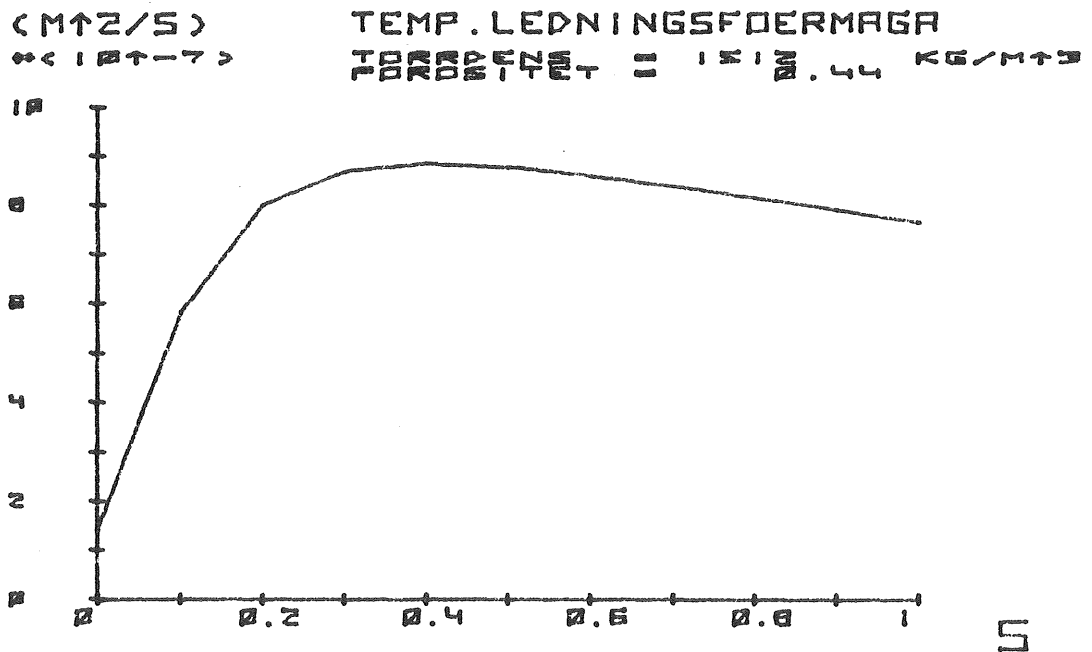
$$\kappa = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \quad (\text{m}^2/\text{s})$$

där λ = värmeledningstalet (W/m, °C)

c = specifika värmekapaciteten (J/kg, °C)

ρ = densiteten (kg/m³)

Diffusiviteten anger hur snabbt ett material värms eller kyls. I figur 13 visas diffusiviteten för en jordart som funktion av vattenhalten vid kvartsinnehållet 0.95.



Figur 13. Temperaturledningsförmågan som funktion av vattenmättnadsgraden för en jordart med viss torrdensitet, porositet och kvartshalten 0.95.

I samband med temperaturförändringar i jordarter definieras ofta den termiska trögheten:

$$b = \sqrt{\lambda \cdot c \cdot \rho}$$

Diffusion av ånga beror på en mängd faktorer bl a fukthalt, luftfuktighet, tillförsel av kapillärvatten, ytans råhet, vegetationen, jordpackning m m. Om markvatten finns tillgängligt går en del av den absorberade strålningen åt till avdunstningsprocessen och mindre del finns då tillgänglig för att värma jordarten. Jordarten blir kallare.

4 FÖRSÖKSBESKRIVNING - ÖVERSIKT

4.1 Princip

Försöken utfördes i klimatkammare där såväl temperatur som luftfuktighet kunde varieras. Försöken uppdelades i två huvudtyper:

- o Simulerad dygnsamplitud, konstant luftfuktighet.
- o Konstant temperatur och luftfuktighet.

Försöksperioden med simulerad dygnsamplitud varierade mellan 303 min och 489 min. Under de olika försöksperioderna ändrades lufttemperaturen efter en sinusfunktion. Lufttemperaturens amplitud varierade mellan ca 16°C och ca 21°C för de olika försöken.

Försöken med konstant temperatur utfördes vid temperaturen, ca 21°C.

Under samtliga försök var målsättningen att hålla konstant fuktighet. Klimatkammarens prestanda medförde dock att luftfuktigheten varierade mellan ca 50-65% relativ fuktighet.

Vid försöken användes två typer av provbehållare, dels 42 liters plastbehållare, dels 265 mls plastbägare. Behållare med olika jordarter, varierande vattenhalt eller olika högt stående grundvattenyta, med eller utan vattengenomströmning placerades i klimatkammaren. Under försöken registrerades lufttemperaturen och jordarternas temperatur på olika nivåer med termometrar och termoelement. De olika jordarterna registrerades under samtliga försöksperioder med en termovisionskamera (AGA 750). Registreringarna gjordes både i svart-vitt och färg, då en separat färgkodningsenhet användes.

4.2 Förberedelser innan försök

Isolering av provbehållare

De stora behållarna isolerades med 10 cm mineralullsmatta runt respektive behållare. Behållarna placerades därefter i klimatkammaren på 10 cm tjocka frigolitskivor. De små behållarna placerades i utstansade hål i frigolitskivor. God tätning mellan behållaren och frigolitskivan erhöles genom tätning med mineralull.

Jordarter - packning

Samtliga prov packades enbart genom lätt skakning av provbehållarna.

Jordarter - vattenhalt

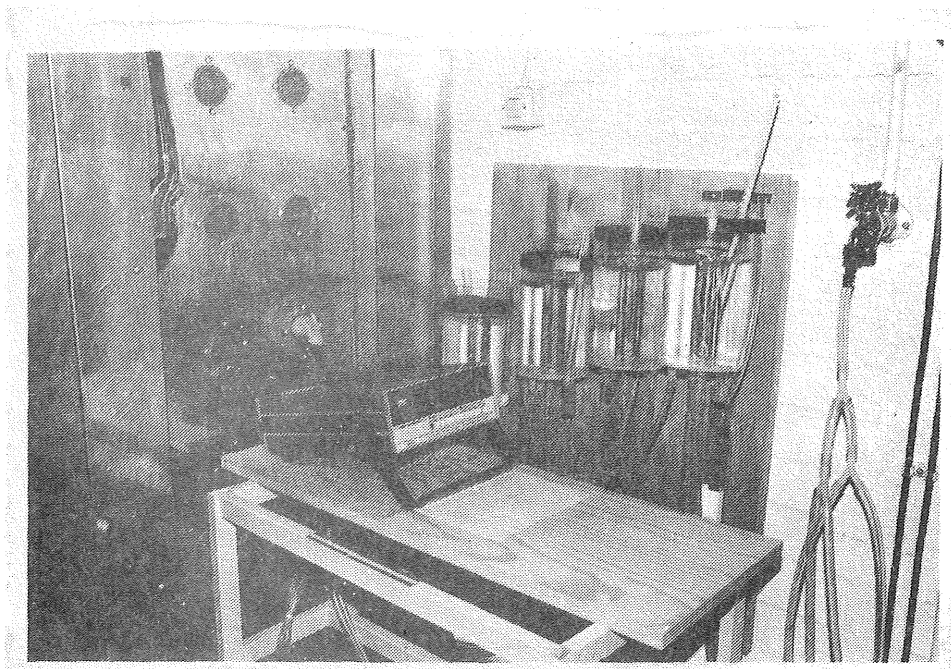
Vattenhalten i provbehållarna varierade mellan torr jordart och vattenmättad jordart. För de små provbehållarna bestämdes vattenhalten på förhand. Samma jordartsmängd (500 gram) vägdes upp. Sedan tillsattes olika mängd vatten som fördelades genom mekanisk omblandning. Därefter packades provbehållarna.

Nivåkärl för konstant grundvattenyta

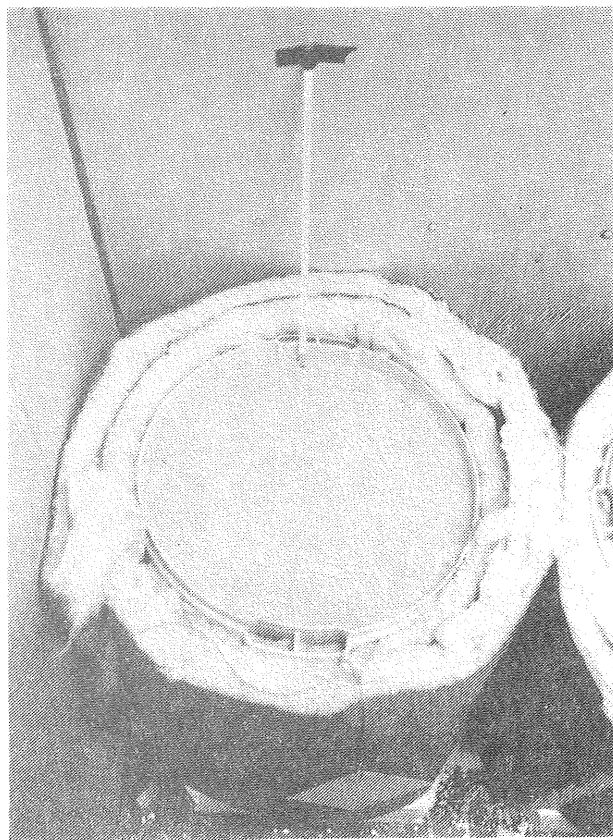
För att hålla konstanta grundvattenytor i provbehållarna anslöts fyra stora provbehållare med slangar till nivåkärl utanför klimatkammaren, figur 14. Nivåkärlet var fast monterade på ett reglerbart stativ. Nivåskillnaden mellan nivåkärlet var 2, 6 och 10 cm. De fyra behållarna utrustades även med ventiler på olika nivå för att vatten långsamt skulle kunna "strömma" igenom behållarna och brädda genom ventilerna. Bräddvattnet leddes via slangar ut från klimatkammaren.

Placering av termometrar och termoelement

Termometrar användes enbart i de stora behållarna. Termometern fixerades i kanten på behållaren på sådant sätt att hela kvicksilverbehållaren (17 mm) placerades under jordartens yta.

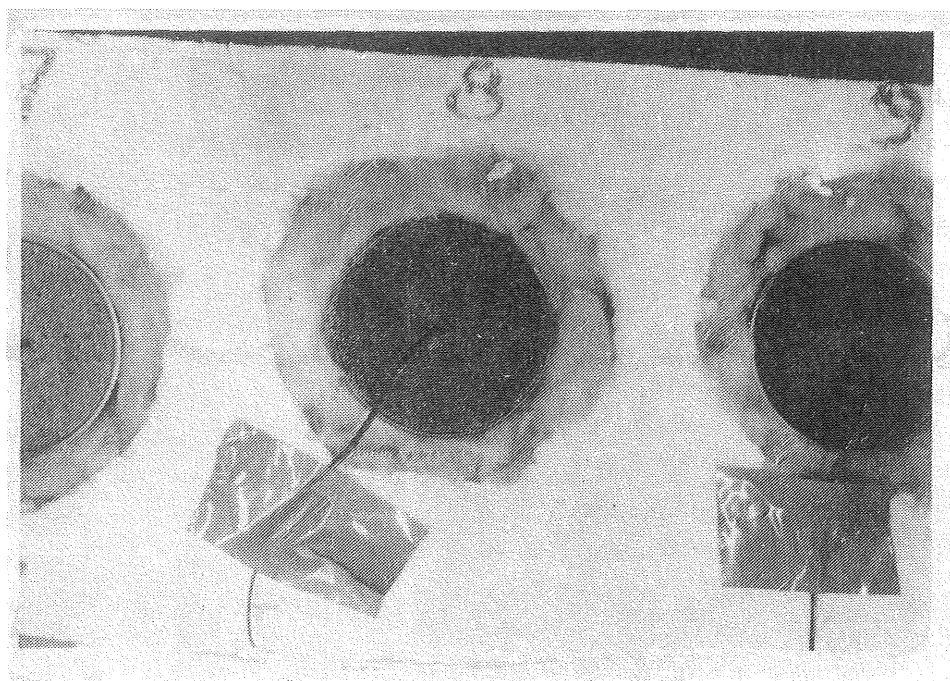


Figur 14. Nivåkärln anslutna till provbehållare för konstant grundvattenyta.



Figur 15. Temperaturmätning med termometer, stor behållare.

Termoelement användes för temperaturmätningar både i de små och stora behållarna. Termoelementen placerades som regel på 1-2 cm djup, i vissa fall ned till 15 cm djup. Registreringsdjupet markerades på termoelementet som sedan trycktes ned till markeringen. I vissa fall trycktes termoelementen ned med ihåliga glasstavar.



Figur 16. Temperaturmätning med termoelement, små behållare.

4.3 Dokumentation efter försök

Vattenhaltsbestämning

Efter försöken bestämdes vattenhalten med hjälp av vägning och torkning vid 105°C . Normalt användes stålcyllindrar med diametern 72 mm och höjden 50 mm. Proven stansades ut i jordartsytan efter försöken. I vissa fall togs prov inom intervallen 0-2 cm, 0-4 cm och 0-8 cm. Vattenhalten i de små behållarna mättes både före och efter försöken. För de små provbehållarna är vattenhalten beräknad på hela provvolymen.

5. TEKNISKA DATA

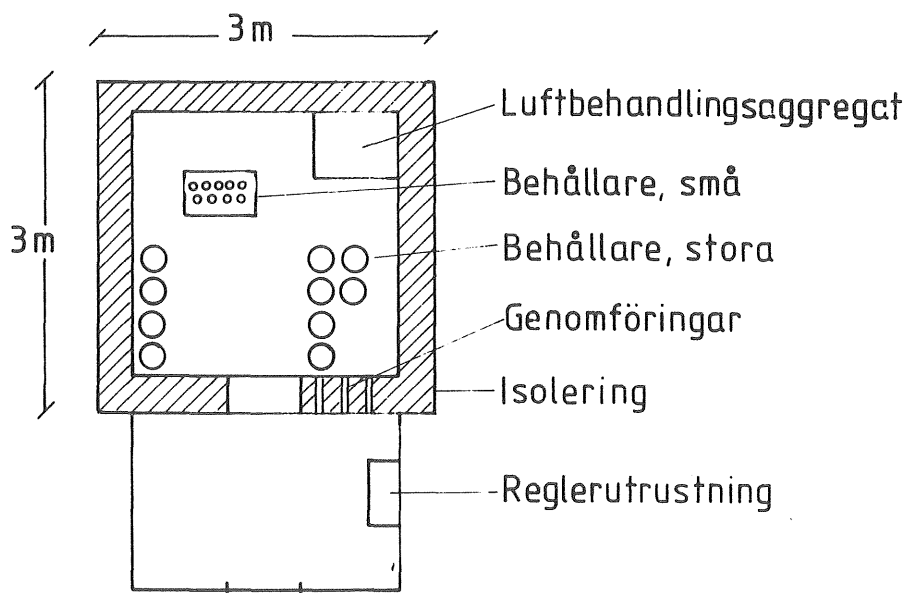
5.1 Klimatkammare

Samtliga försök utfördes i klimatkammare, figur 17. Klimatkammarens prestanda framgår av tabell 1. Värmning sker elektriskt, genom dels doppvärmare i bassängvatten och dels med luftvärmare. Kylning sker indirekt med cirkulerande köldbärare (glykol). Fuktning sker med cirkulerande vatten över en dysbank av skrubberkonstruktion. Hela utrustningen är placerad i ett luftbehandlingsaggregat.

Tabell 1. Data, klimatkammare.

Temperaturområde		Kyleffekt	Värmeeffekt
torr temp °C	våt temp °C	kcal/h	kw
+ 5 - + 30	- 10 - + 30	5000 +	7 + 6
- 10 - + 11	- 10 - + 8	6000	

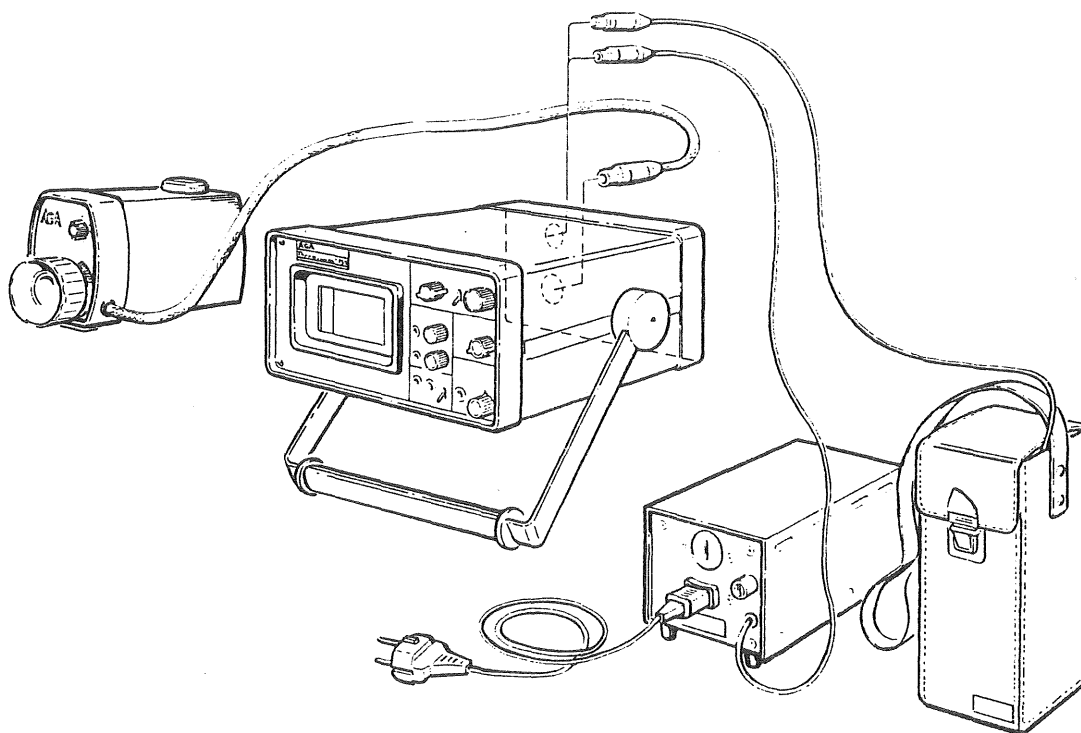
För att hålla konstant luftfuktighet justerades torr- resp våttemperaturen med utgångspunkt från Mollier-diagram. Klimatkammaren var försedd med programstyrning. På grund av fel på reglerutrustningen fick dock klimatkammaren regleras manuellt. Detta gjordes med jämna tidssteg under samtliga försöksperioder.



Figur 17. Klimatkammare, planskiss.

5.2 Termovisionsutrustning

Registreringen utfördes med ett AGA termovisionskamera-system (750). Utrustningen består av en kamera, bild-enhet, färgkodningsenhet och tillbehör, figur 18.



Figur 18. Termovisionsutrustning (AGA, 1974).

Den emitterade infraröda strålningen vidarebefordras av ett IR-optiskt system till en IR-detektor. Systemet består av ett objektiv och ett antal rörliga prismor. Detektorn omvandlar IR-strålningen till en videosignal, som efter förstärkning överförs till bildenheten. För att få optimal temperaturkänslighet kyls detektorelementet med flytande kväve. Signalen från kameran omvandlas i bildenheten och en gråtonsbild av värmefördelningen presenteras direkt

på bildskärmen. Bildenheten har enkla kontroller som gör det lätt att ställa in olika funktioner bl a bildpresentation, temperaturnivå och område samt isotermfunktion. Temperaturskillnader mellan det avbildade föremålets olika delar mäts med en sk isotermfunktion. Då temperaturen sammanfaller med den inställda isoternivån, framträder dessa områden som mättat vita på gråbilder eller separat på en svart bakgrund. Isoternivån och bredden kan väljas steglöst inom hela det valda temperaturområdet. Med hjälp av isotermfunktionen kan temperaturskillnader mätas. Temperaturupplösningen är ca 0.2°C . Kamerans spektralområde ligger mellan 2-5.6 μm . Som alternativ finns en utrustning som täcker spektralområdet ca 8-14 μm .

För att vertikala registreringar skulle kunna utföras kompletterades registreringssystemet med en försilvrads spegel. Spegeln placerades i 45° vinkel mot strålgången.

Registreringarna dokumenterades med hjälp av två polaroid-kameror, en för svart-vita bilder och en för färgbilder.

5.3 Temperaturmätningar

Termoelement

För temperaturmätningarna användes termoelement (Cu/Co). Arbetsområdet för termoelementen ligger mellan -270°C och $+400^{\circ}\text{C}$. Inom det aktuella temperaturområdet ca $10-30^{\circ}\text{C}$ är känsligheten $40 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$. Avläsningarna gjordes med hjälp av en mätcentral med digital display (FLUKE), till vilken 10 termoelement kunde kopplas. Upplösningen var 0.1°C .

Termometrar

Under försöken användes även konventionella laboratorietermometrar av kvicksilvertyp. Termometerns upplösning är 0.1°C inom temperaturintervallet $0-50^{\circ}\text{C}$.

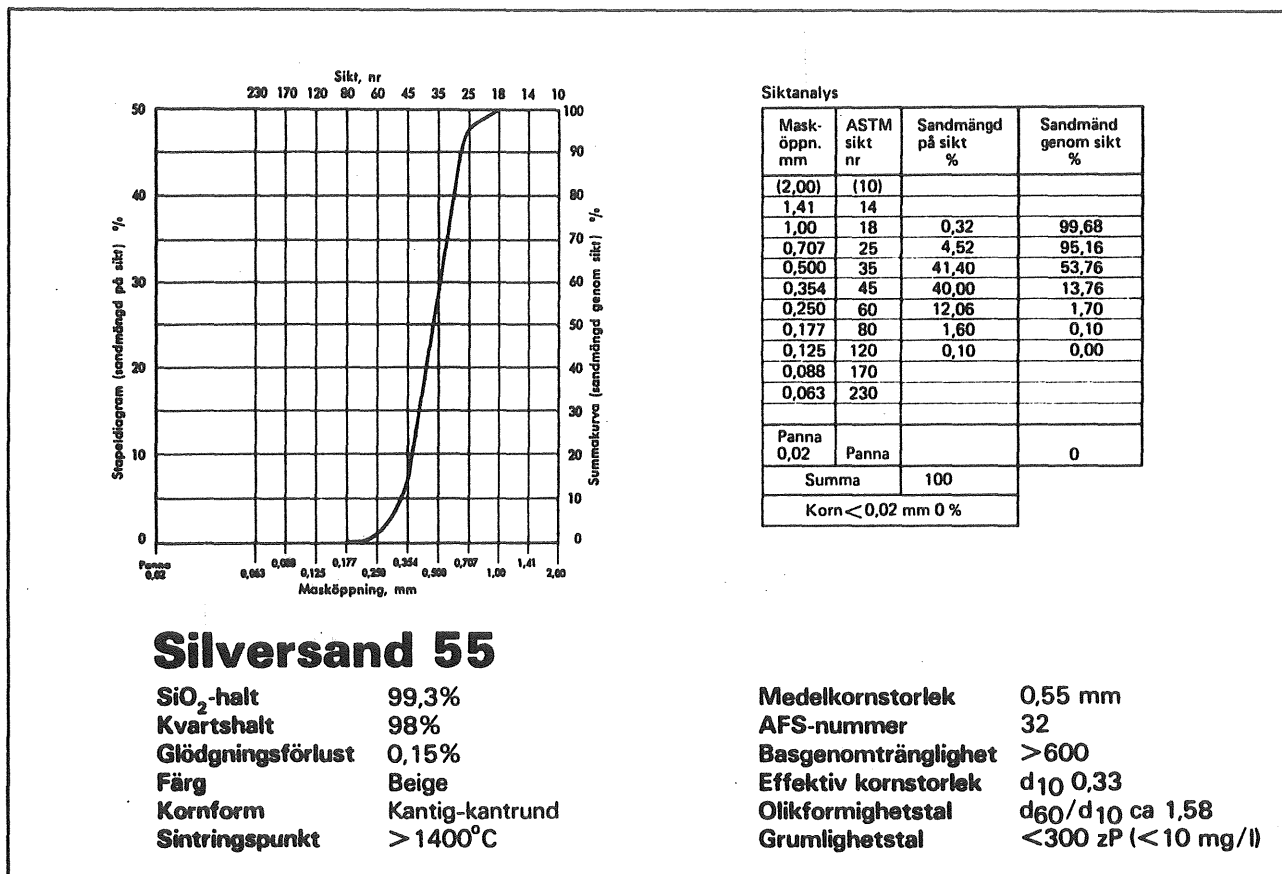
Kalibrering

Termoelementen och termometrarna kalibrerades i ett isbad tillsammans med en kvartstermometer (Hp-2804A). Under kalibreringsförsöket visade kvartstermometern $0.031-0.033^{\circ}\text{C}$. Termometrarna visade $0.1-0.2^{\circ}\text{C}$ högre temperatur jämfört med kvartstermometern. Termoelement med kabellängden 4 m visade temperaturvärdet $0.0-0.1^{\circ}\text{C}$ medan termoelement med kabellängden 10 m visade temperaturvärdet $0.0-0.4^{\circ}\text{C}$. Under försöket användes termoelement med båda kabellängderna. Till mätcentralen kopplades dock alltid termoelement med samma kabellängd. Eftersom mätvärdet genomgående fluktuerade användes alltid det lägsta värdet som visades på displayen.

6. JORDART

6.1 Mekanisk sammansättning

Vid försöken användes huvudsakligen ren kvartssand s k filtersand. Kornstorleksfördelningen och andra data redovisas i figur 19.



Figur 19. Kornstorleksfördelning för den filtersand som användes vid försöken (Ahlzell IR, 1978).

Kapillariteten uppmättes under ett dygn till ca 7 cm. Sandens porositet i löst lagrat tillstånd har uppmätts till ca 40%.

Några termovisionsregistreringar utfördes även på en grusig och en moig jordartsfraktion.

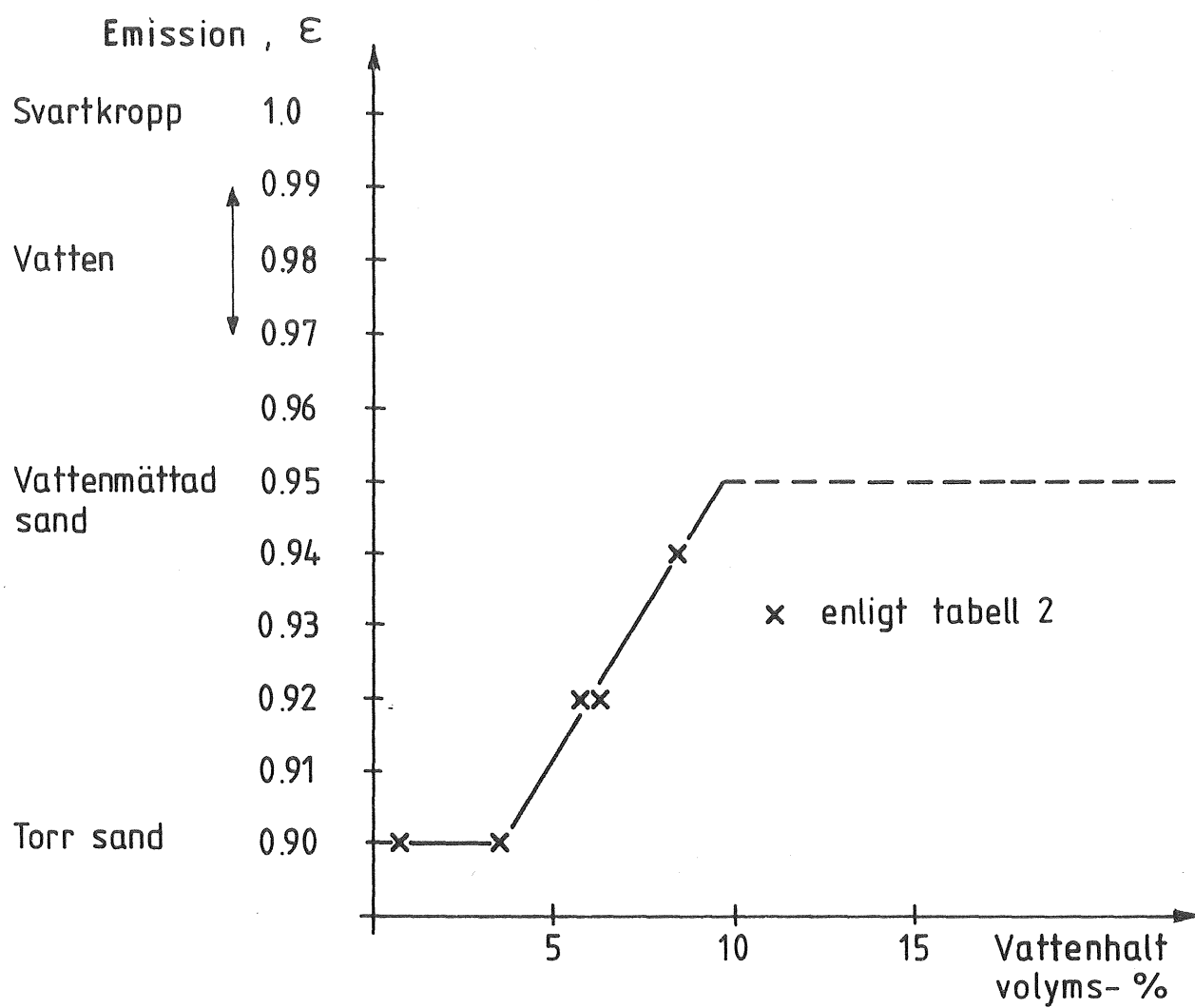
6.2 Emission

Jordarternas emission varierar mellan ca 0.7-0.95 beroende på textur, kornstorlek, mineralogisk sammansättning, humusinhåll m m. Dessutom ökar emissionen med ökat vatteninnehåll. Emissionen för sand varierar främst beroende på sandens vattenhalt. Tabell 2 visar emissionen för sand vid några olika vattenhalter (Lundén 1977).

Tabell 2. Förhållandet mellan emission (8-13 μm) hos sand och volymetrisk vattenhalt i jordens översta 2,5 cm (Lundén 1977, efter Fuchs & Tanner 1968).

Volymetrisk vattenhalt (%)	Emission
0.7	0.90
3.5	0.90
5.8	0.92
6.2	0.92
8.4	0.94

Med utgångspunkt från tabell 2 och uppgifter om emissionsvärden från litteraturen har emissionsvärden för sand plottats mot vattenhalten, figur 20. Detta samband har använts vid utvärderingen. För vattenhalter över ca 10 volymprocent antas att emissionen antar värdet 0.95.



Figur 20. Emissionens variation med vattenhalten.

7. TERMOVISIONSREGISTRERING

7.1 Princip

Vid temperaturmätningar med termovisionskameran relaterades alltid det uppmätta värdet till en referens med känd temperatur. Genom att använda isotermfunktionen kan isotermskillnaden mellan objekt och referens beräknas. Referenstemperaturen bör ej avvika allt för mycket från objekttemperaturen. För att beräkna objektets verkliga temperatur måste dessutom omgivningstemperaturen samt objektets och referensens emission vara kända.

7.2 Utvärdering

Vid utvärderingen används kalibreringskurvor för omvandling av isotermerheter till grader Celsius och vice versa. Kalibreringsdiagrammets upplösning är relativt dålig. Det är därför svårt att överföra beräknad isotermnivå (I_o) till verklig temperatur ($^{\circ}\text{C}$). Eftersom det approximativt råder ett rätlinjigt samband mellan I_o och verklig temperatur inom intervallet ca $20\text{--}40^{\circ}\text{C}$ har valts att redovisa den beräknade temperaturen i isotermerheter (I_o). De I_o -värden som redovisas i rapporten kallas även för skenbar temperatur. Observeras bör att hänsyn alltid har tagits till variationer i emission både för objekt och referens.

Den grundläggande formeln för att bestämma ett objekts isotermnivå (I_o) och därmed dess sanna temperatur (T_o) är:

$$I_o = \frac{\Delta_{ior}}{\epsilon_o} + \frac{\epsilon_r}{\epsilon_o} \cdot I_r + \left(1 + \frac{\epsilon_r}{\epsilon_o}\right) I_a$$

Om objektets emission är lika med referensens emission reduceras uttrycket till:

$$I_o = \frac{\Delta_{ior}}{\epsilon_o} + I_r$$

Vid en temperaturbestämning med termovisionskamera ingår följande parametrar:

T_o	objekttemperatur, °C
T_r	referenstemperatur, °C
T_a	omgivningstemperatur, °C
I_o	absolut isoternivå för objektstemperatur T_o ("skenbar temperatur")
I_r	absolut isoternivå för referenstemperatur T_r
I_a	absolut isoternivå för omgivningstemperaturen T_a
ϵ_o	objektets emission
ϵ_r	referensens emission
Δ_{ior}	isotermkillnad objekt - referens $(i_o - i_r) \times$ mätområde

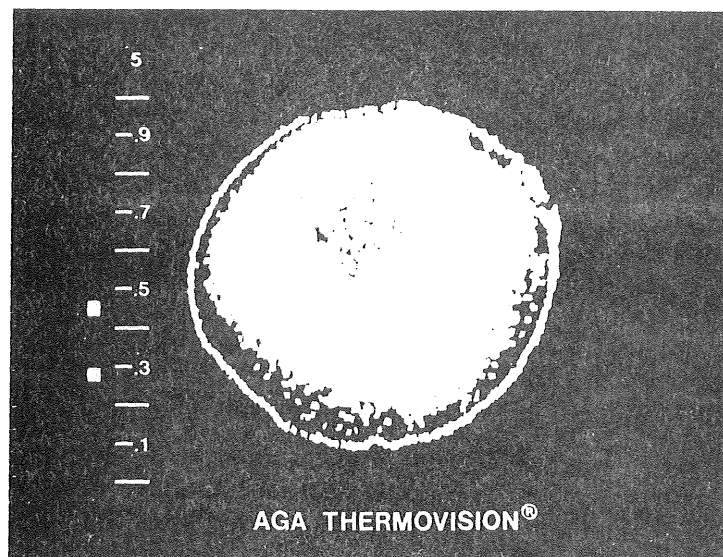
7.3 Utförande

Under försöksperioderna registrerades behållarna med intervall på ca 20-40 minuter.

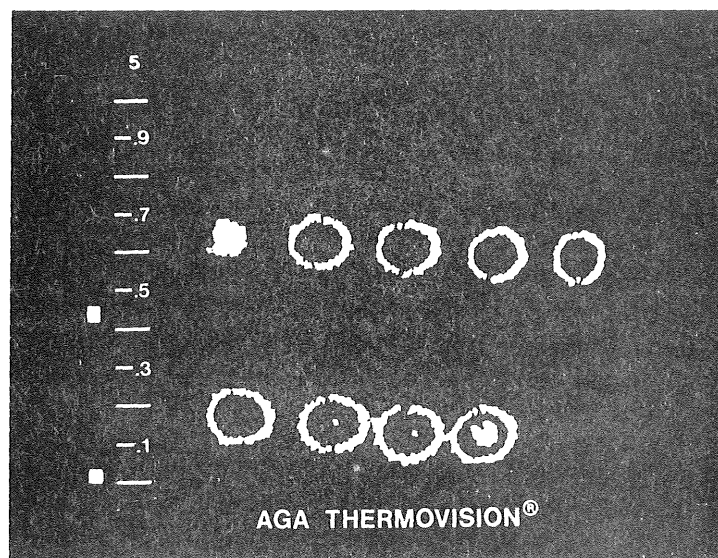
Vid termovisionsregistreringen användes en torr jordart som referens. Den ena isoterme ställdes in på sådant sätt att så stor yttäckning som möjligt erhöles på referensen. Sedan registrerades övriga behållare. För varje behållare ställdes den andra isoterme in på motsvarande sätt. Båda isotermvärdena dokumenterades genom fotografering, se figur 21.

När de stora behållarna registrerades förflyttades kameran manuellt mellan behållarna. De små behållarna registrerades med fast kamerauppställning. När de små behållarna registrerades lades den ena isoterme på den torra jordarten medan den andra successivt ställdes in på de övriga behållarna, se figur 22.

Efter varje ändring i isoternivå dokumenterades försöksbehållarna genom fotografering.



Figur 21. Exempel på isoterskillnaden (Δ_{ior}) mellan referens och registrerat objekt, stor behållare.
 $\Delta_{ior} = 5(0.29-0.46) = -0.85$. Det registrerade objektet har alltså en isoternivå som är 0.85 enheter lägre jämfört med referensen.



Figur 22. Exempel på isoterskillnaden (Δ_{ior}) mellan små behållare med olika vattenhalt. Referensen har lagts på den torra behållaren (1) överst till vänster, avsökningen av de övriga behållarna har påbörjats. I figuren ovan har den andra isotermen lagts på behållare 9, nederst till höger, där full yttäckning ännu ej har erhållits. Behållare 7 och 8 som är något varmare börjar också framträda på bilden. Isoterskillnaden (Δ_{ior}) kan på bilden framräknas till $5(0.03-0.45) = -2.10$ men är i själva verket något lägre eftersom full yttäckning ej ännu erhållits för behållare 9.

7.4 Störningar - felkällor

Uppmätning av referenstemperatur

Jordtemperaturen har som regel uppmätts på nivån 1-2 cm under markytan. Yttemperaturen skiljer sig sannolikt något från den uppmätta vid varje avläsningstillfälle. Om temperaturen på 1-2 cm djup under markytan används som referenstemperatur vid utvärderingen av termovisionsbilderna kommer för låga temperaturvärden att erhållas under en uppvärmningsfas. Under en avkylningsfas kommer på motsvarande vis för höga temperaturvärden att erhållas. Eftersom avsikten varit att visa den inbördes temperaturskillnaden mellan behållarna har detta faktum ansetts ha mindre betydelse.

Lufttemperaturen

Lufttemperaturen har ej uppmätts i anslutning till varje behållare. Om temperaturfördelningen i klimatkammaren är ojämn, vilket har dokumenterats, inverkar detta vid resultatutvärderingen.

Isotermfunktion

Isotermen har ställts in för att få så stor yttäckning som möjligt. Denna princip medför att en subjektiv värdering görs vid varje registrering. Vid små isoterskillnader kan därför en viss skillnad i isoternivå erhållas, speciellt om inställningen görs av olika personer.

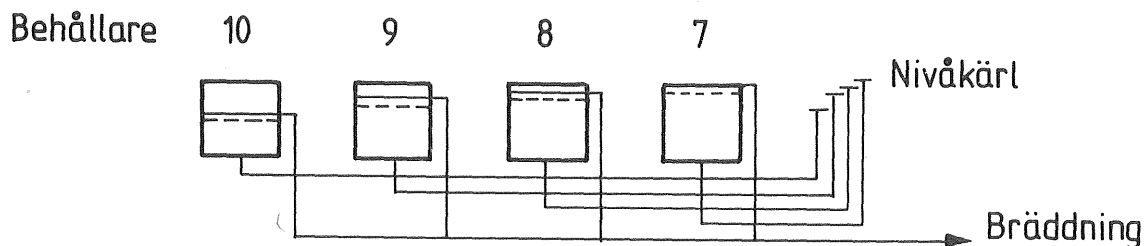
Variationer i emission

Vattenomsättningen i jordartsytan under försöken medför att emissionen i vissa fall minskar något med tiden. Vid beräkningarna har använts ett emissionsvärde för jordarten men hänsyn har också tagits till jordartens vattenhalt. Jordarternas vattenhalt har beräknats från provtagningar 0-5 cm och redovisar således ej vattenhalten i själva markytan. I vissa fall har vattenhalten beräknats för intervallet 0-2 cm.

8. FÖRSÖKSSAMMANFATTNING

8.1 Simulerade utströmningsförsökFörsöksbeskrivning

Klimatkammaren inställdes på konstant temperatur. Vatten med några grader lägre temperatur strömmade sakta från nivåkärlen med konstant tryckhöjd, genom jordarten i de fyra behållarna och bräddade på olika nivåer. Vattnet ledde till och från behållarna via plastslangar (\varnothing 8 mm) se figur 23.



Figur 23. Principskiss, utströmningsförsök.

Behållare 7 bräddade 2 cm under markytan

---	8	---	4 cm	---
---	9	---	8 cm	---
---	10	---	20 cm	---

Efter ca 16 timmar uppmättes temperaturen med termoelement på två olika nivåer samt med termometrar i markytan. Den relativa luftfuktigheten var under försöket ca 65%.

Referensisotermen ställdes in på behållare 10. Därefter registrerades övriga behållare enligt de principer som redovisas i kapitel 7.

Två utströmningsförsök genomfördes. Försöksdata har sammanfattats i tabell 3 och 4.

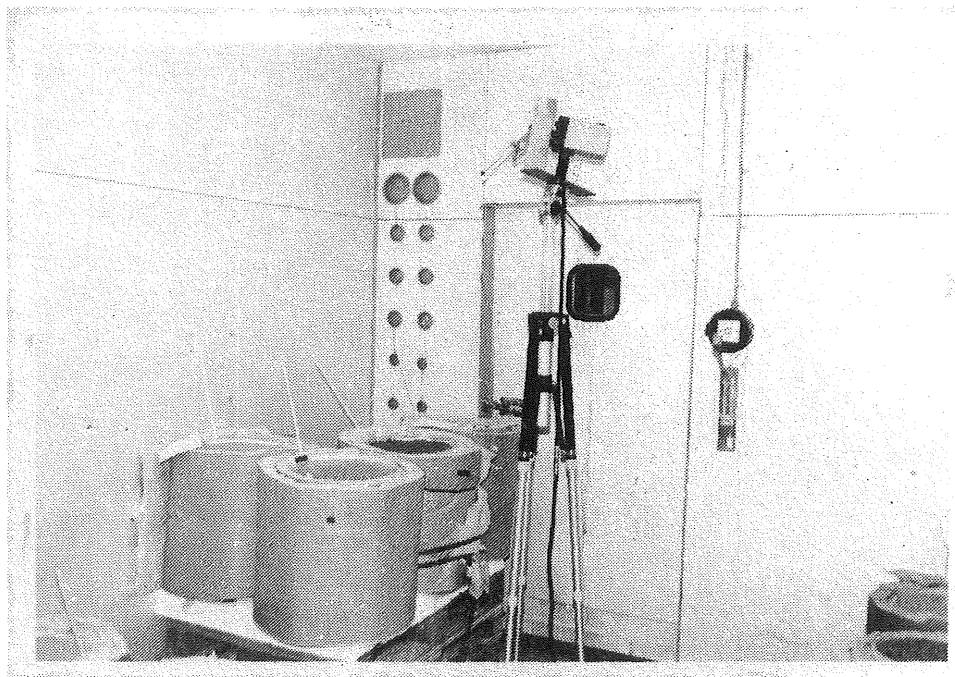
Tabell 3. Uppmätt temperatur vid utströmningsförsök 1 och beräknad skenbar temperatur (I_0) från termovisionsregistrering.

Behållare	10	9	8	7	Luft (1.0 m)	Vatten (Nivåkärl)
Temperatur °C						
Termoelement (1 cm)	20.7	18.8	18.3	18.3	21.0	
Termoelement (9 cm)	19.8	18.3	18.3	18.5		
Termometer (0-2 cm)	20.7	18.5	18.2	18.3		17.6
Termovision Δ_{ior}	ref	-0.78	-0.90	-0.95		
Termovision I_0	ref	20.99	20.86	20.81		

Tabell 4. Uppmätt temperatur och vattenhalt vid utströmningsförsök 2 samt beräknad skenbar temperatur (I_0) från termovisionsregistrering.

Behållare	10	9	8	7	Luft (1.0 m)	Vatten (Nivåkärl)
Temperatur °C						
Termoelement (1 cm)	21.6	20.1	16.3	16.1	22.0	
Termoelement (5 cm)	20.4	19.2	15.8	15.9		
Termometer (0-2 cm)	-	-	-	-		16.8
Termovision Δ_{ior}	ref	+0.02	-0.02	-0.06		
Termovision I_0	ref	22.74	22.70	22.65		
Vattenhalt (0-2 cm vikts-% av torrt prov)	0.3	8.0	25.4	27.3		

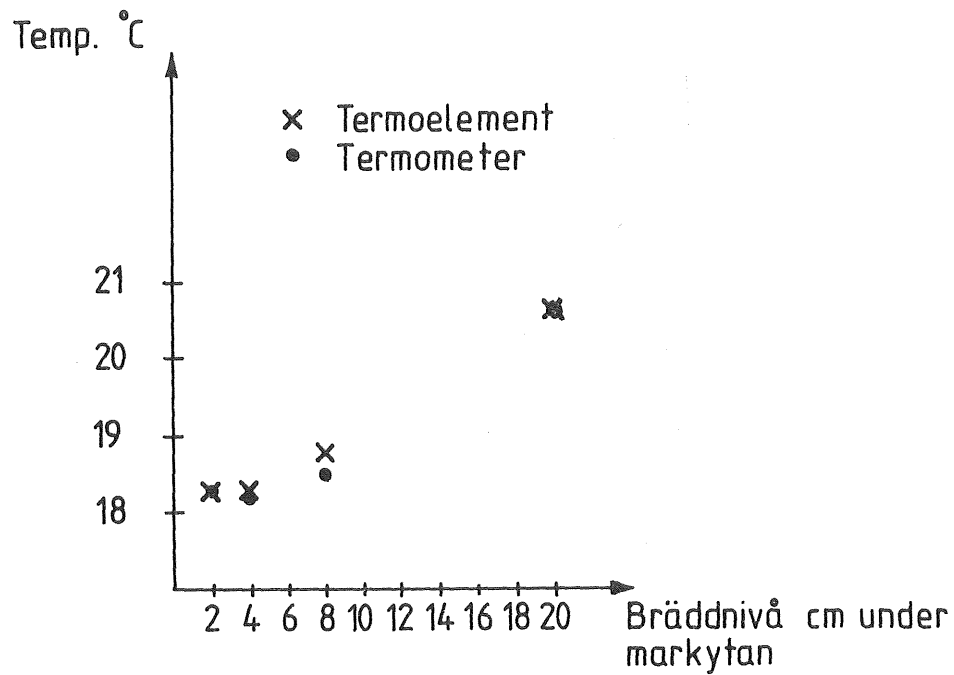
Figur 24 visar termovisionsregistreringen vid utströmningssöksomprovet.



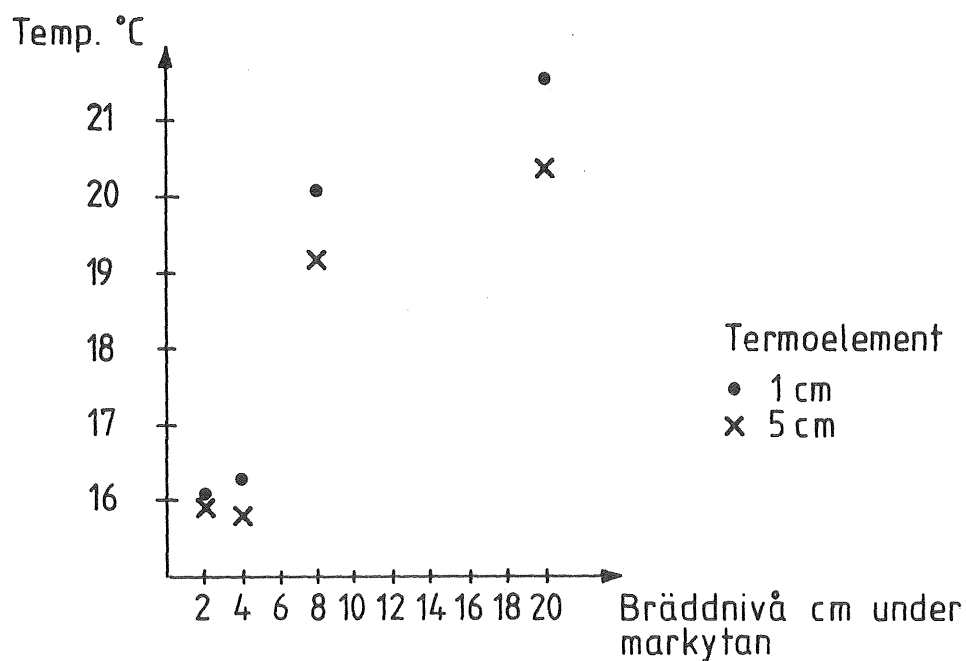
Figur 24. Termovisionsöksomprovet i klimatrummet, utströmningssöksomprovet.

Resultat

Temperaturen var högst i behållare 10 som hade lägst bräddnivå. Temperaturen minskar sedan i ytan för behållarna med ytligare bräddnivå, figur 25 och 26.



Figur 25. Yttemperaturens variation beroende på bräddnivå, försök 1.



Figur 26. Yttemperaturens variation beroende på bräddnivå, försök 2.

Termovisionsmätningen visar att behållare med ytligare bräddnivå erhåller en ökad negativ isotermskillnad. Detta framgår både i de svart-vita bilderna och efter färgkodning. Utförda beräkningar visar att den skenbara temperaturen (I_0) och därmed även den verkliga temperaturen minskar för behållare med ytligare bräddnivå. Skillnaden mellan behållarna är dock ej lika stor som temperaturmätningarna visar. Man bör observera att de båda mätningarna redovisar temperaturvärden på olika nivåer i jordarten.

Vid beräkning av den skenbara temperaturen har korrektion gjorts för emissionsvariationer beroende på vattenhalt och omgivningstemperatur, se kapitel 7 och 6.2.

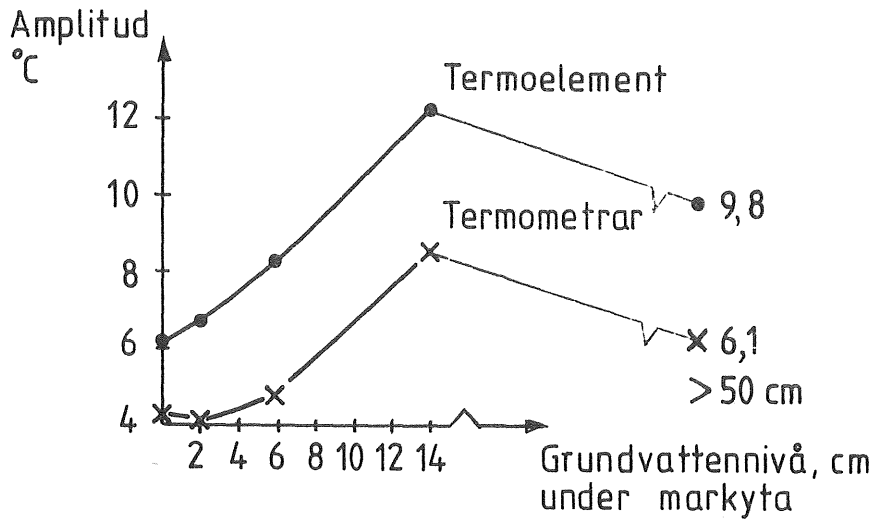
8.2 Simulerad dygnsamplitud, stora behållare med olika grundvattennivåer

Försöksbeskrivning

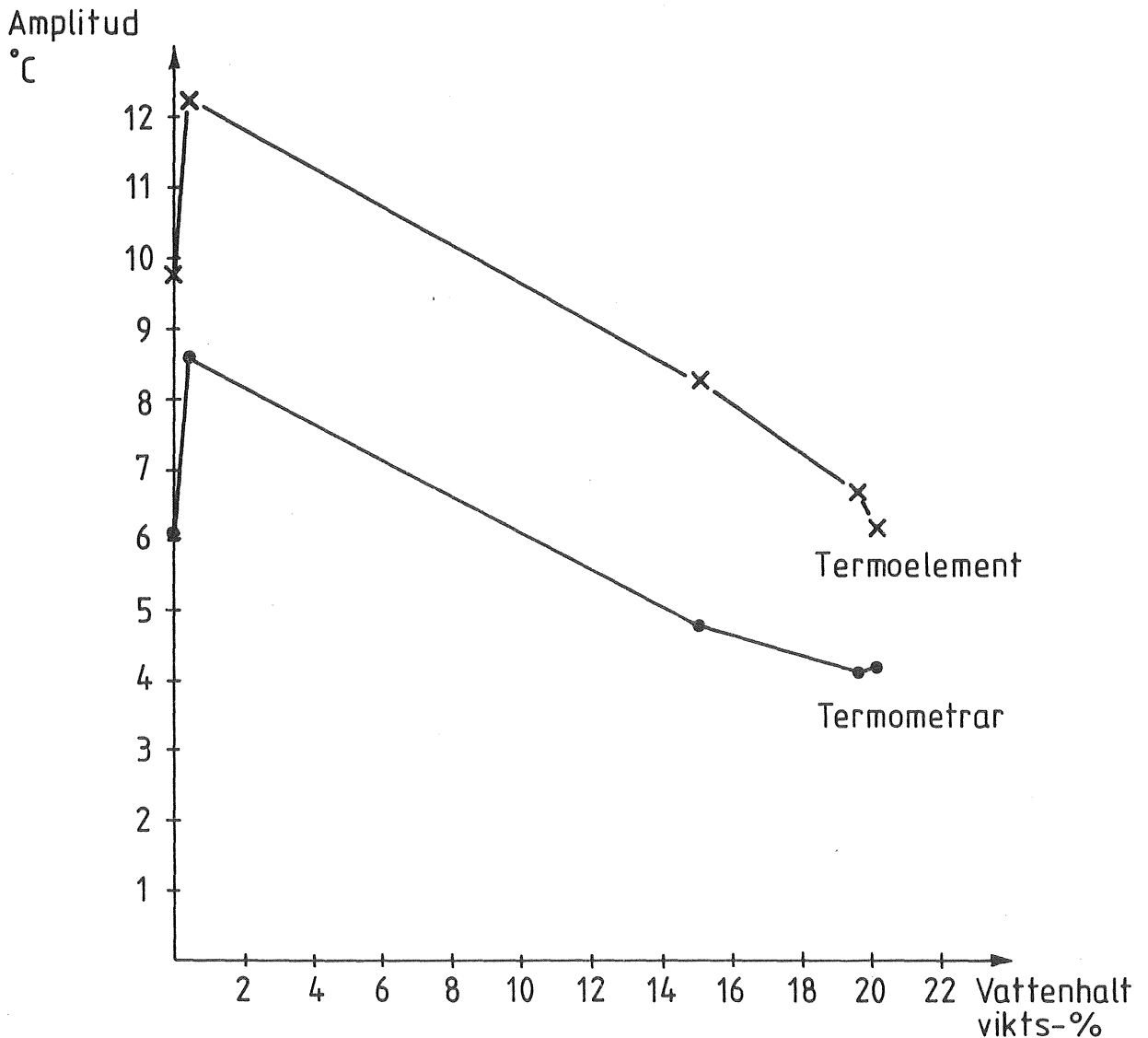
Innan försöket påbörjades hölls konstant lufttemperatur (ca 20°C) under 15 timmar. När försöket påbörjades ökades temperaturen till ett maximum på 33.5°C. Sedan minskades temperaturen till ett minimum på 12.2°C för att ånyo höjas till 27.3°C. Försöksperioden varade i 413 minuter.

I fyra av behållarna hölls konstant grundvattenyta utan vattengenomströmning med nivåkärl, ytterligare en behållare var helt torr. Behållare 1 stod en meter lägre än behållare 7-10.

Behållare	Grundvattennivå under markyta (m)
7	0
8	0.02
9	0.06
10	0.14
1	torr



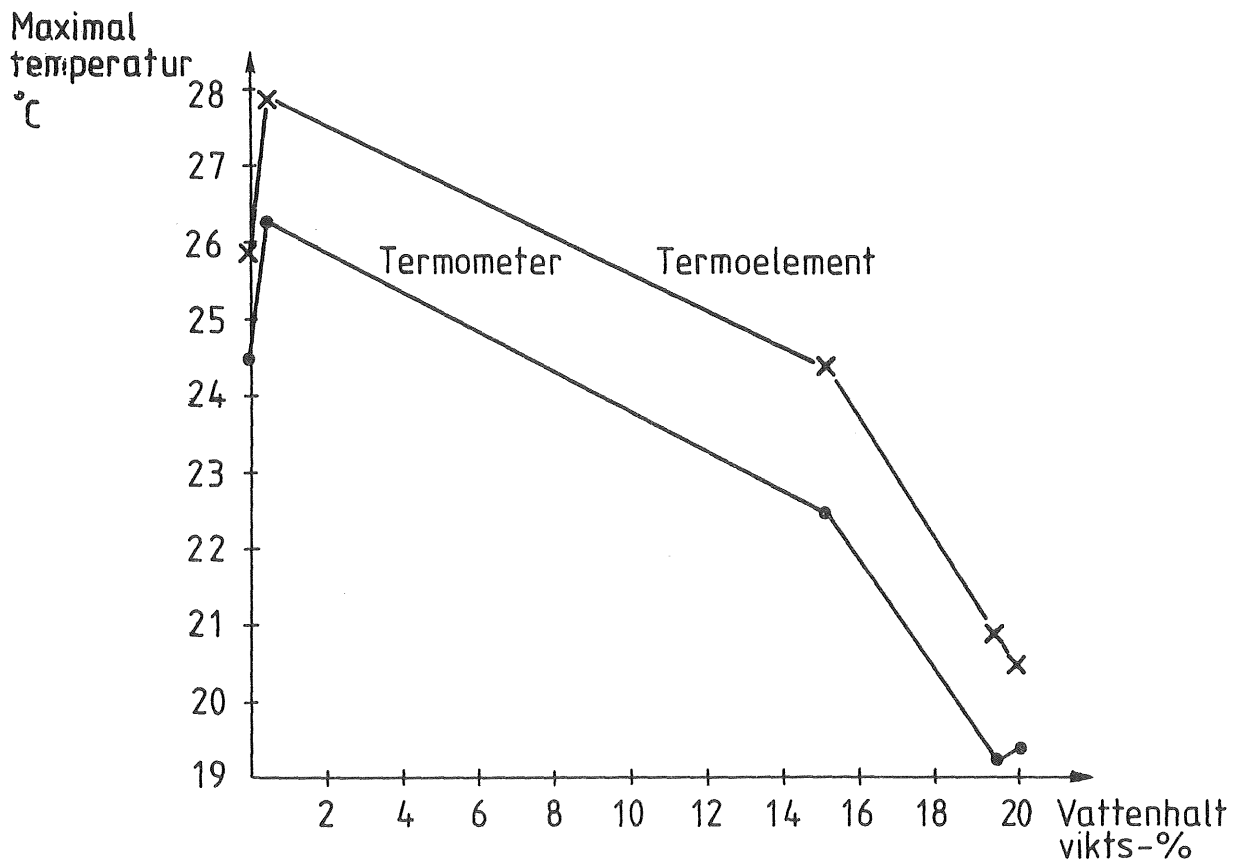
Figur 27. Temperaturamplituden plottad mot uppmätt grundvattennivå, behållare 7-10 samt behållare 1 (torr), vid försök med simulerad dygnsamplitud och konstanta grundvattennivåer.



Figur 28. Temperaturamplituden plottad mot vattenhalten (0-5 cm) för behållare 7-10 samt behållare 1 (torr), vid försök med simulerad dygnsamplitud och konstanta grundvattennivåer.

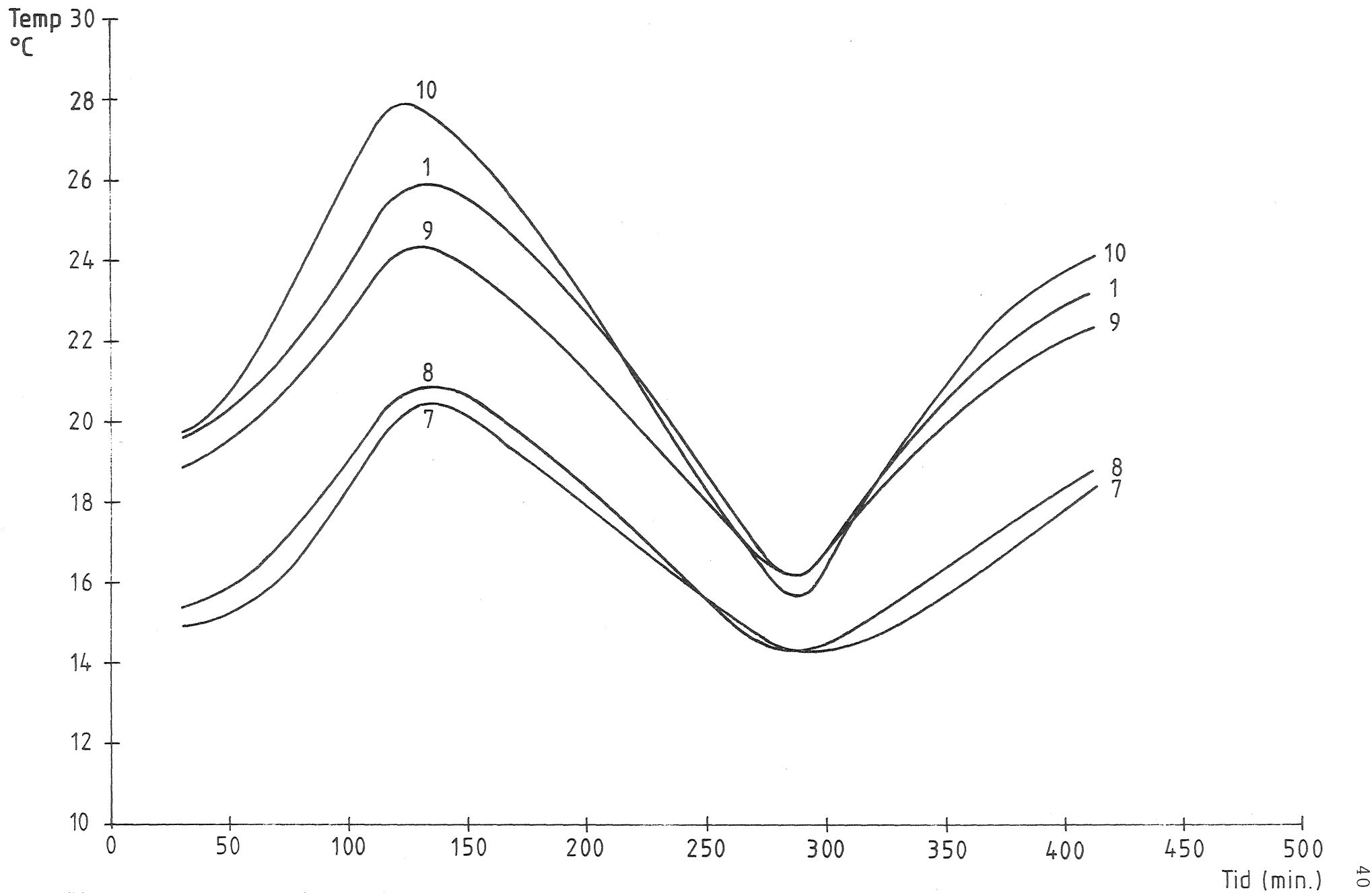
Temperaturamplituden plottad mot vattenhalten uppvisar en kurvform som liknar kurvformen för en sandig jordarts temperaturledningsförmåga.

Även jordarternas maximala temperatur har plottats mot vattenhalten, figur 29. Kurvan uppvisar samma kurvform som när temperaturamplituden plottades mot vattenhalten. Figuren avspeglar den energiomsättning som äger rum vid avdunstningsförloppet. Detta förlopp beror i sin tur av de temperaturledande egenskaperna i jordarten. Med andra ord åtgår mer energi till avdunstningen vid höga vattenhalter vilket gör ytan kallare.

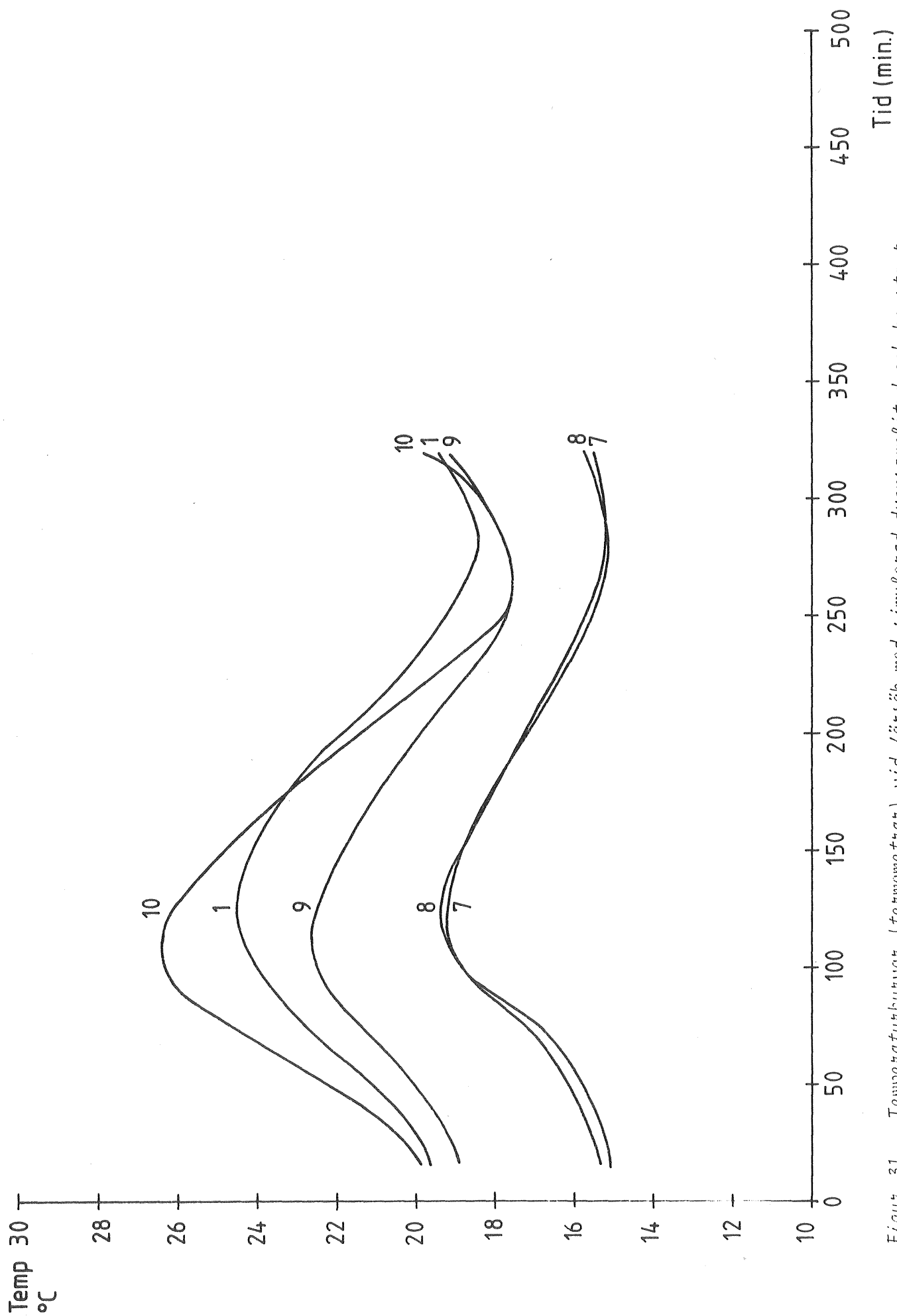


Figur 29. Maximal temperatur plottad mot vattenhalten (0-5 cm) för behållare 7-10 samt behållare 1 (torr) vid försök med simulerad dygnsamplitud och konstanta grundvattennivåer. Den maximala lufttemperaturen var 33.5°C.

Temperaturkurvorna från försöket, figur 30 och 31 visar att spridningen i temperatur för de olika behållarna är störst för maximivärdet. Av temperaturkurvorna framgår också att jordarter med högre vattenhalt eller ytligare grundvattenyta, vid varje mättillfälle har lägre temperatur, till en tidpunkt



Figur 30. Temperaturkurvor (termoelement) vid försök med simulerad dygnsamplitud och konstanta grundvattennivåer (behållare 7-10).



Figur 31. Temperaturkurvor (termometrar) vid försök med simulerad dygnsamplitud och konstanta grundvattennivån (behållare 7-10).

strax innan minimitemperaturen uppnås. Samma förhållande föreligger även då temperaturen ånyo ökas. Denna trend gäller ej för den helt torra behållaren. Jämför med tidigare slutsatser.

Resultat - termovisionsmätningar

Uppmätta isotermnivåer och isotermskillnader under försöket redovisas i tabell 6.

Tabell 6. Registrerade isotermnivåer och utvärderade isotermskillnader (Δ_{ior}) vid försök med simulerad dygnsamplitud och konstanta grundvattennivåer.

Tid	Mätområde	Behållare	Isotermnivå	Isotermskillnad Δ_{ior}
25 min	2	1	0.44	
	"	10 ref.	0.44	0
	"	9	0.42	-0.04
	"	8	0.37	-0.14
	"	7	0.38	-0.12
66 min	"	1	0.44	
	"	10 ref.	0.44	0
	"	9	0.41	-0.06
	"	8	0.37	-0.14
	"	7	0.37	-0.14
96 min	"	1	0.39	
	"	10 ref.	0.38	0
	"	9	0.37	-0.02
	"	8	0.35	-0.06
	"	7	0.33	-0.10
244 min	"	1	0.51	
	"	10 ref.	0.50	0
	"	9	0.50	0
	"	8	0.47	-0.06
	"	7	0.45	-0.10

Tabell 6 visar att isotermnivån vid de redovisade tidpunkterna minskar med ökande vattenhalt eller ytligare grundvattennivå, dock ej i närheten av minimitemperatur (323 min) samt vid 196 min, ej redovisat i tabell 6.

Tabell 7 redovisar beräknad skenbar temperatur (I_0) med utgångspunkt från isotermskillnaden (Δ_{ior}) från tabell 6. Vid beräkningarna har emissionen för jordarten i behållare 10 antagits vara 0.90. De övriga behållarna (9-7) antas ha emissionsvärdet 0.95 enligt figur 20. Utvärdering har gjorts enligt de principer som redovisas i kapitel 7.

Tabell 7. Beräknad skenbar temperatur (I_0) vid försök med simulerad dygnsamplitud och konstanta grundvattennivåer.

Tid	Behållare	Skenbar temperatur (I_0)
25 min	10 ref.	
	9	22.05
	8	21.94
	7	21.96
66 min	10 ref.	
	9	26.13
	8	26.05
	7	26.05
96 min	10 ref.	
	9	28.16
	8	28.12
	7	28.08
244 min	10 ref.	
	9	21.92
	8	21.85
	7	21.81

Den skenbara temperaturen (I_0) minskar med ökande vattenhalt eller ytligare grundvattennivå utom vid 25 min där behållare 7 ligger något högre än behållare 8 samt vid 66 min där behållare 7 och 8 uppvisar samma värde. Observera att förhållandena vid mycket låga vattenhalter ej framgår vid denna utvärdering.

De genomförda försöken har visat att ytliga temperaturvariationer som orsakas av vattenhaltsvariationer på 10-15 cm djup kan detekteras med termovisionskameran.

8.3 Simulerad dygnsamplitud, små behållare med olika vattenhalt

Försöksbeskrivning

Dagen innan försöket iordningställdes 9 prov med vattenhalter från 0 till ca 25 viktprocent vatten av torrvikten. Provbehållarna försågs med lock som togs av först när försöken påbörjades.

Försöket pågick under 303 minuter. Under denna period sänktes lufttemperaturen från begynnelsestemperaturen 27.2°C till minimitemperatur 11.1°C för att ånyo höjas till 23.4°C.

Temperaturen uppmättes med termoelement i varje behållare på nivån 1 cm under jordartens överyta. Under försöket registrerades samtidigt alla behållarna med termovisionskamera. Behållarna registrerades före försökets start samt 25, 35, 50, 65, 102 och 130 minuter efter temperaturvariationen påbörjats.

Temperaturmätningar - resultat

Temperaturdata och vattenhalt redovisas i tabell 8.

Tabell 8. Temperaturdata och vattenhalter uppmätta vid försök med simulerad dygnsamplitud, små behållare, jordarter med olika vattenhalt.

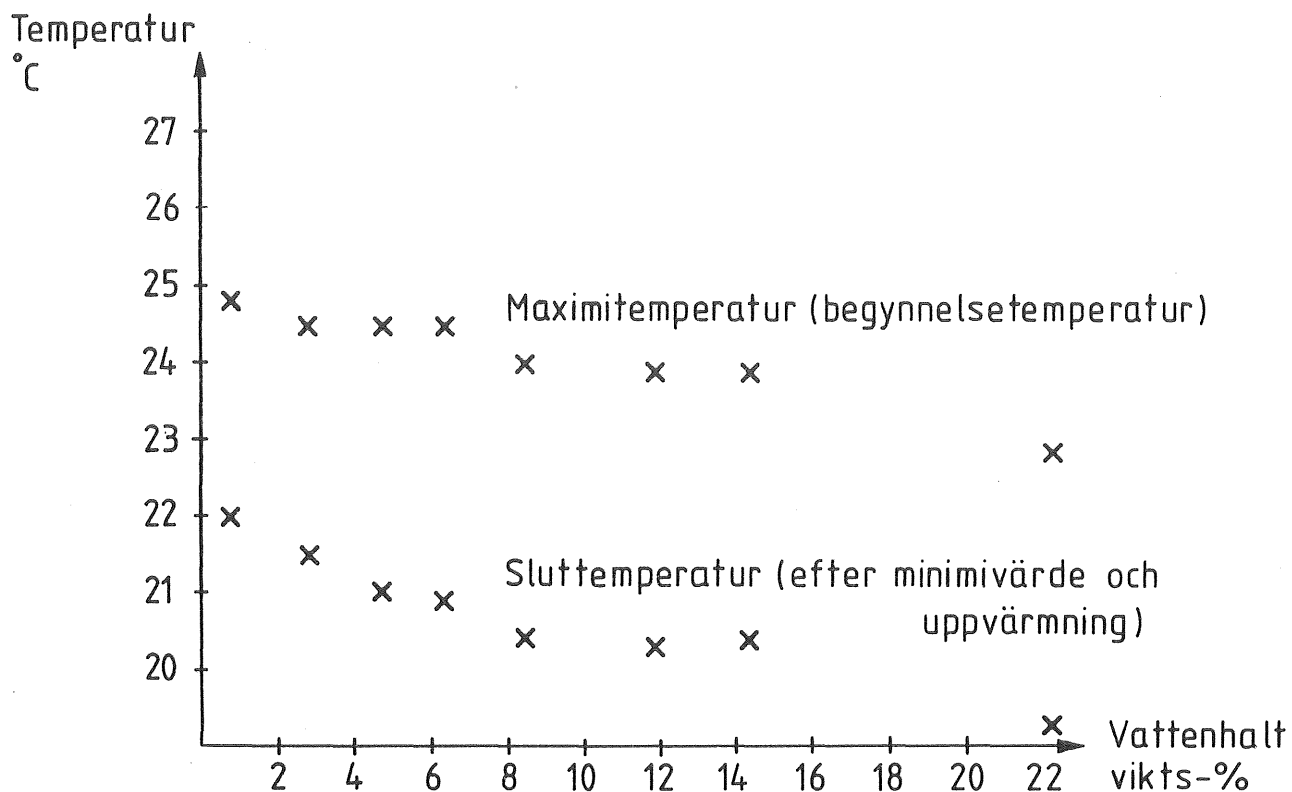
Behållare		1 ¹	2	3	4	5	6	7	8	9	Luft
Temperatur	max	(25.9)	24.8	24.5	24.5	24.5	24.0	23.9	23.9	22.9	
	min	(14.6)	14.9	14.0	13.7	13.5	13.3	13.5	13.5	13.9	
startt.-mint.	ampl	(11.3)	9.9	10.5	10.8	11.0	10.7	10.3	10.4	9.0	
	slutt	(22.7)	22.0	21.5	21.0	20.9	20.4	20.3	20.4	19.2	
mint-slutt.	ampl	(8.1)	7.1	7.5	7.3	7.4	7.1	6.7	6.9	5.3	
Vattenhalt ²	vikts%	0.1	0.9	2.7	4.7	6.3	8.4	11.8	14.3	22.2	

¹ Under försöket upptäcktes att mätpunkten endast låg 3 mm under markytan.

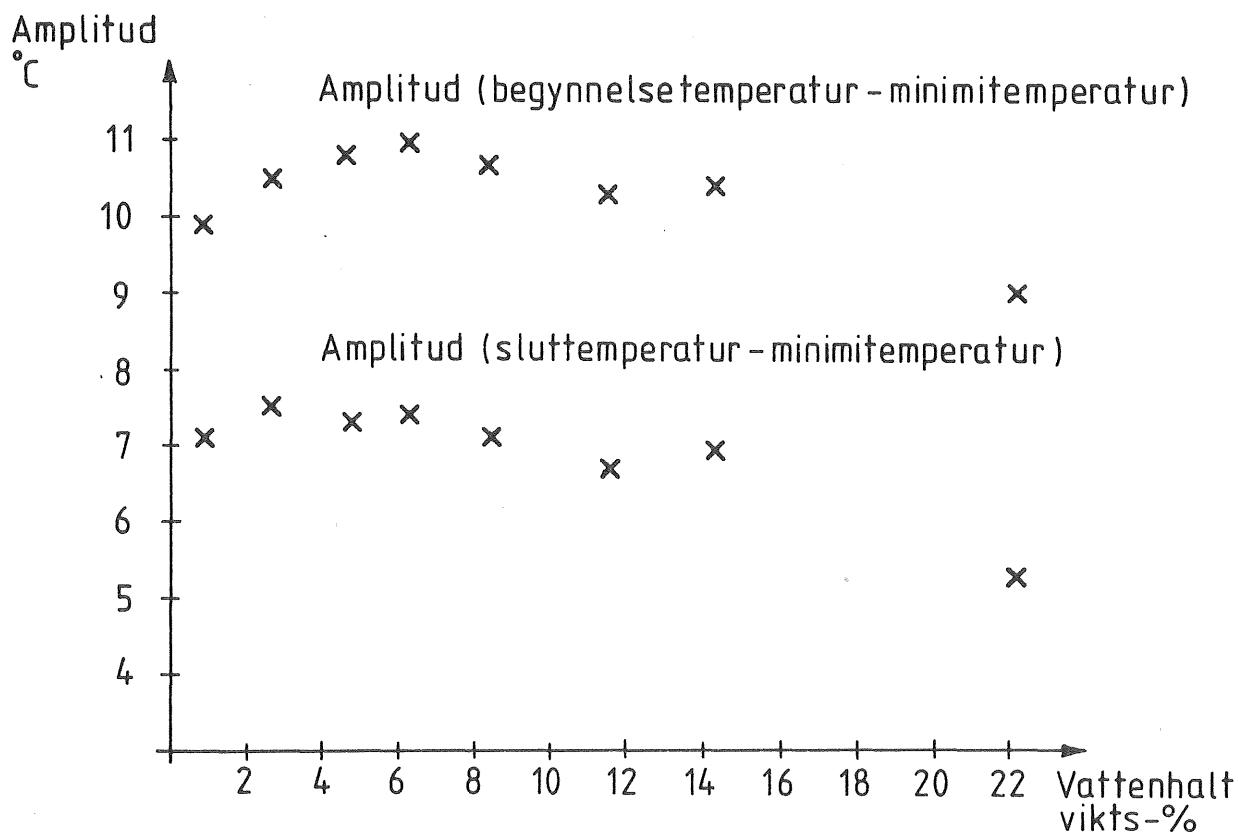
² Vattenhalten har beräknats för hela provet efter försöket.

Maximitemperaturen (begynnelsestemperaturen) minskar för de olika behållarna med ökad vattenhalt. Motsvarande resultat erhålls om sluttemperaturen plottas mot vattenhalten, figur 32.

Om temperaturamplituden plottas mot vattenhalten erhålls en kurva med samma kurvform som temperaturledningsförmågan för en sandig jordart, figur 33, jfr figur 13. Dvs temperaturamplituden ökar vid låga vattenhalter för att vid en viss vattenhalt minska med ökande vattenhalter. "Passningen" är god utom för den torra behållaren. Orsaken till detta är att termoelementet i den torra behållaren satt endast 3 mm under ytan. Termoelementet trycktes ned till nivån 1 cm under ytan strax innan minimitemperatur uppnåddes under försökets gång.



Figur 32. Maximitemperatur och sluttemperatur för jordarter med olika vattenhalt vid försök med simulerad dygnsamplitud.



Figur 33. Temperaturamplituder för jordarter med olika vattenhalt vid försök med simulerad dygnsamplitud

Termovisionsregistrering - resultat

I figur 34 redovisas ett exempel på en termovisionsregistrering (tre polaroidfoton av bildskärmen). Den översta bilden redovisar isotermnivåerna för den torra behållaren (1) och behållaren med högst vattenhalt (9). Isotermkillnaden Δ_{ior} är:

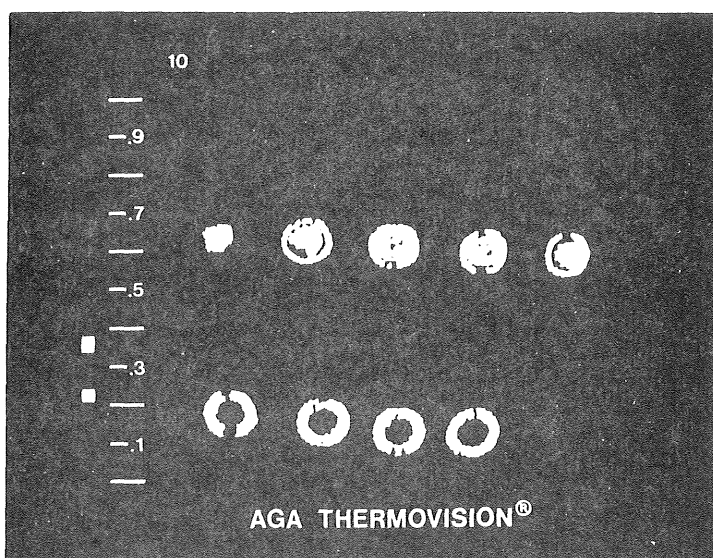
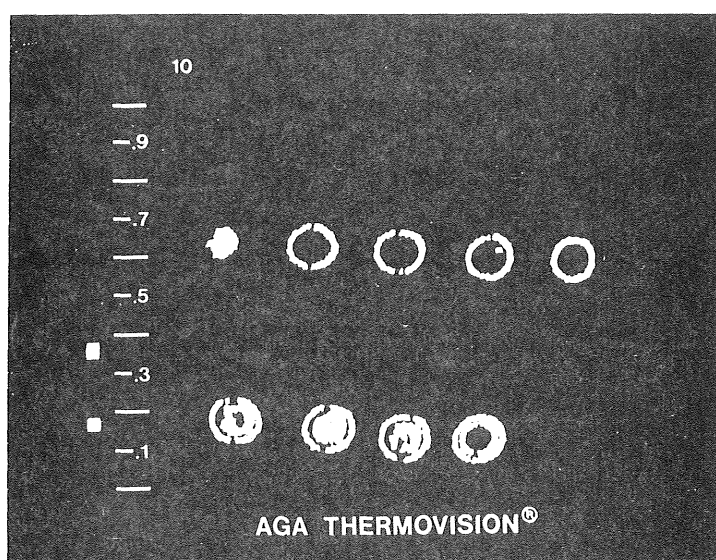
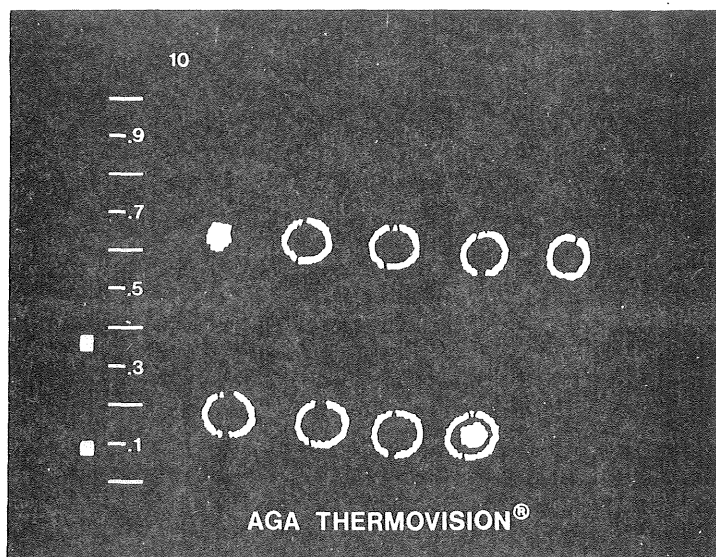
$$10(0.10-0.38) = -2.8$$

På mittenbilden har isotermen lagts på behållare 7 med lägre vattenhalt. Behållare 8 uppvisar något lägre isotermnivå och behållare 6 något högre isotermnivå, full yttäckning har ej erhållits. Den nedersta bilden visar att isotermnivån är i stort sett lika för behållarna 2, 3, 4 och 5.

I tabell 9 har behållarna graderats inbördes dels efter isotermnivå (A), dels efter uppmätt temperatur med termoelement (B).

Av tabell 9 framgår att korrelationen är god för temperaturer uppmätta med termoelement och isotermnivån som uppmätts med termovisionskameran. Korrelationen är sämre efter 102 min och 130 min, strax innan minimitemperaturen uppnås, se även kapitel 9.

Av termovisionsregistreringen framgår att isotermnivån vid samtliga mättillfällen är högst för de torraste behållarna (1 och 2). Successivt lägre isotermnivåer erhålls för behållarna 6, 7, 8 och 9 med högre vattenhalt. Den inbördes isotermnivån varierar för behållarna 3, 4 och 5 som har vattenhalter mellan ca 3 och 7 viktsprocent.



Figur 34. Isotermnivåer och isotermskillnader för jordarter med olika vattenhalt (behållare 1-9, behållare 1 överst till vänster är torr, behållare 9 nederst till höger är fuktigast) vid försök med simulerad dygnsamplitud.

Tabell 9. Inbördes gradering av jordarter med olika vattenhalt efter A, isotermnivå och B, temperaturmätning med termoelement, vid försök med simulerad dygnsamplitud.

Mätmetod

A	1	2	3	5	4	6	7	8	9	0 min
B	1	2	3	4	5	7	8	6	9	
A	1	2	4	5	3	6	7	8	9	25 min
B	1	2	5	4	3	6	7	8	9	
A	1	2	5	4	3	6	7	8	9	35 min
B	1	2	5	4	3	6	7	8	9	
A	1	2	4	5	3	6	7	8	9	50 min
B	1	2	4	5	3	6	7	8	9	
A	1	2	5	4	8	3	6	7	9	65 min
B	1	2	5	4	3	6	7	8	9	
A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	102 min
B	2	1	5	9	4	3	7	8	6	
A	1	2	5	4	3	6	7	8	9	130 min
B	2	9	1	3	5	4	7	8	6	

A Gradering med utgångspunkt från isotermnivå.

B Gradering med utgångspunkt från temperaturmätningar med termoelement (1 cm).

6 7 Behållare med samma temperatur eller isotermnivå vid respektive mättillfälle.

Kommentar Vattenhalten ökar från behållare 1 till behållare 9.

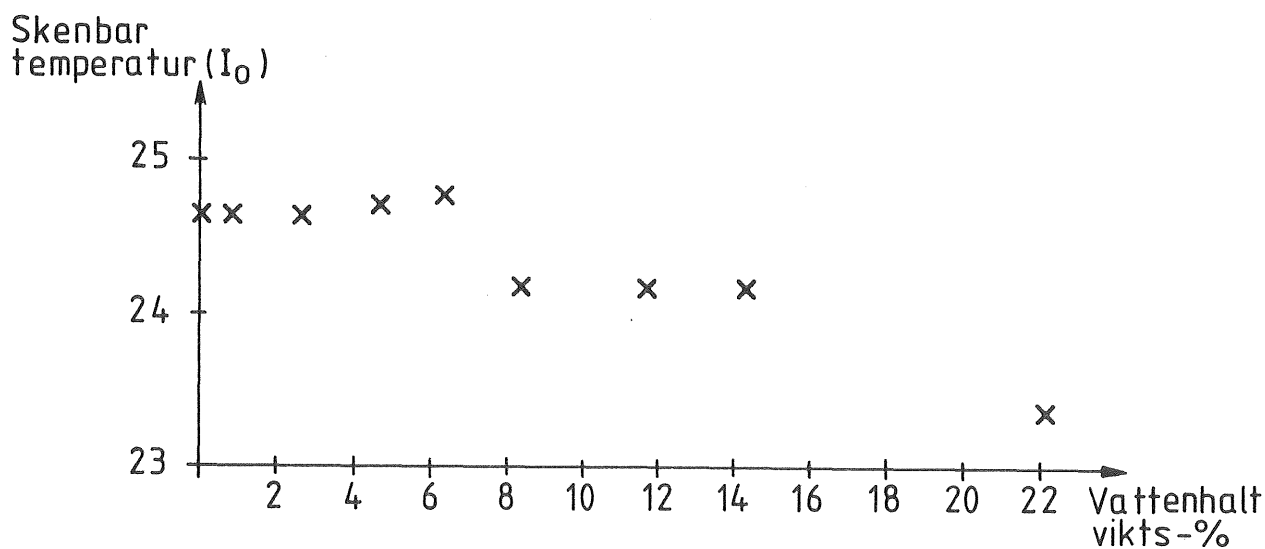
Den uppmätta isotermnivån redovisas i tabell 10. Här har samma isotermnivå getts till behållare med nära varandra liggande isotermnivåer. I princip hade det varit möjligt att ställa in isotermnivån på varje behållare. För att hålla kostnaderna nere har dock endast 3-4 bilder tagits vid varje registreringstillfälle.

Tabell 10. Uppmätta isotermnivåer för jordarter med olika vattenhalt vid försök med simulerad dygnsamplitud.

Tid	Mätområde	Behållare	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	10		0.38	0.24	0.24	0.24	0.24	0.18	0.18	0.18	0.10
25	5		0.36	0.22	0.22	0.22	0.22	0.14	0.14	0.14	0.03
35	5		0.53	0.29	0.24	0.29	0.29	0.19	0.19	0.19	0.15
50	5		0.54	0.37	0.31	0.31	0.37	0.26	0.26	0.26	0.21
65	2		0.76	0.53	0.12	0.25	0.25	0.12	0.12	0.12	0.12
102	2	inverterad	1.02	0.77	0.59	0.59	0.59	0.59	0.59	0.59	0.68
130	5	---	0.73	0.68	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64

Den skenbara temperaturen I_0 har beräknats vid försöksstart för de olika behållarna. Vid beräkningen har hänsyn tagits till emissionsvariationer beroende på olika vattenhalt och omgivningstemperaturen. Isotermkillnaden (Δ_{iOR}) har beräknats från isotermnivåerna i tabell 10.

Den skenbara beräknade temperaturen I_0 vid försöksstart redovisas i figur 35 där I_0 har plottats mot jordarternas vattenhalt. De uppmätta temperaturskillnaderna kan hänföras till varierande värmeförluster beroende på vattenhalten vid avdunstningsförloppet.



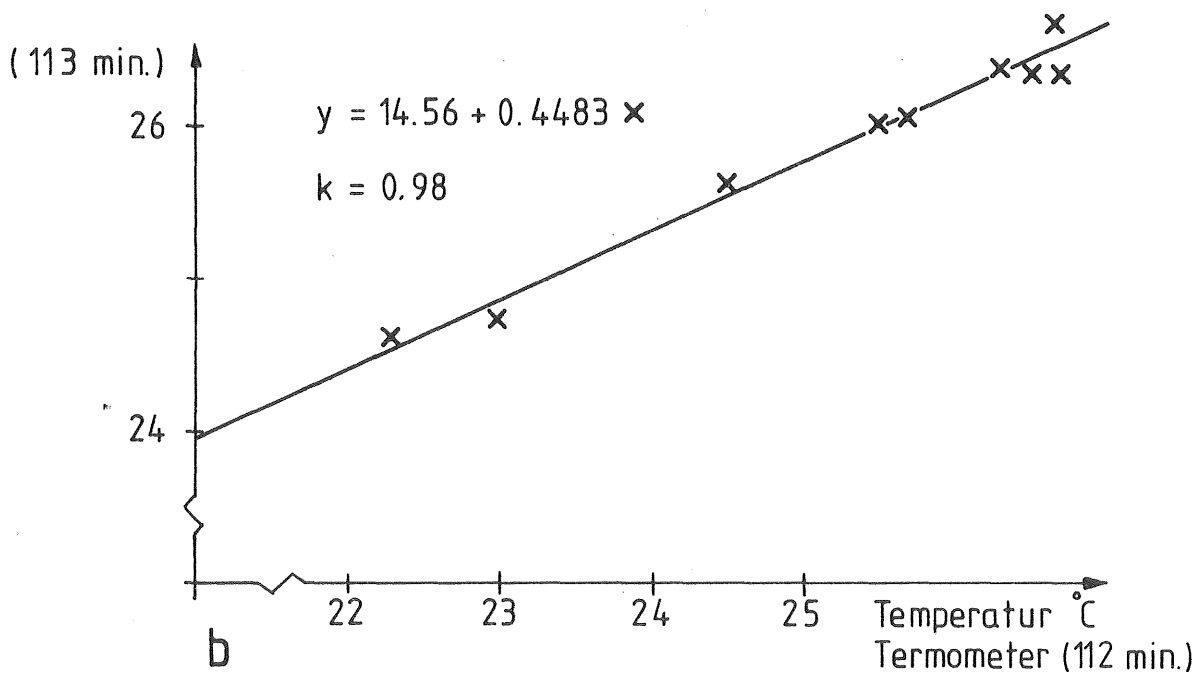
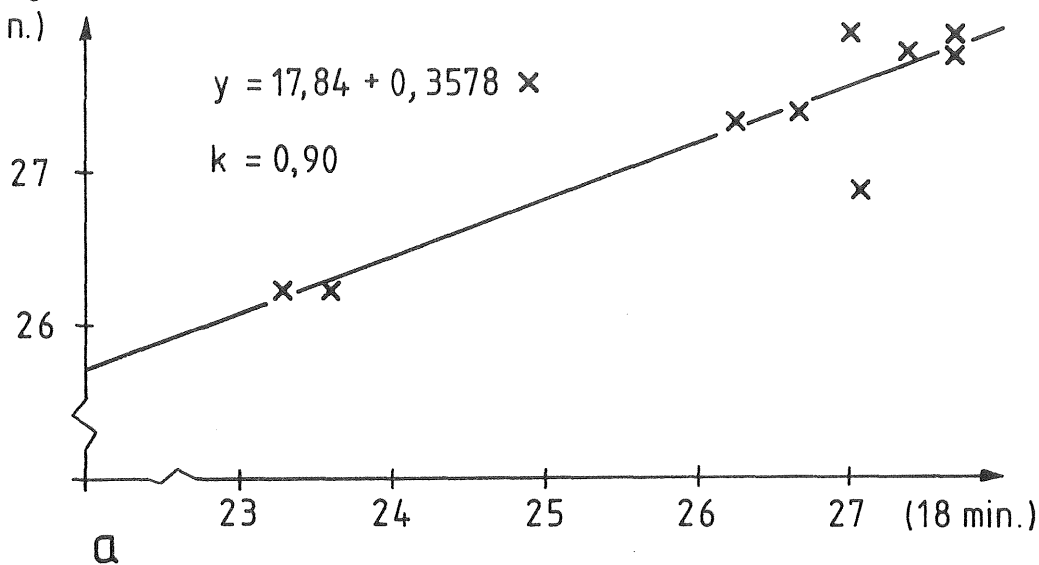
Figur 35. Beräknad skenbar temperatur (I_0) efter termovisionsregistrering för jordarter med olika vattenhalt vid försök med simulerad dygnsamplitud, försöksstart.

9. JÄMFÖRELSE MELLAN TEMPERATURMÄTNING MED
TERMOVISIONSKAMERA OCH TERMOMETER

En grundförutsättning för att använda termovisionskameran för bestämning av vattenhalt är att termovisionskameran verkligen kan mäta små temperaturskillnader på markytan. För att belysa detta har den beräknade skenbara temperaturen (I_0) plottats mot, med termometer uppmätt temperatur för jordarter med olika vattenhalt vid två försök, figur 36 och 37. Registreringen med termovisionskameran har jämförts med närliggande temperaturdata från termometrarna. Avläsningarna varierar något i tiden, vilket framgår av diagrammen.

Korrelationen mellan de båda metoderna är god. Korrelationskoefficienten är större än 0.9 (rätlinjig regression) utom vid minimitemperatur vid ett försök. Temperaturen som uppmätts med termovisionskamera är dock konsekvent högre. Det kan förklaras genom att termovisionskameran mäter temperaturen på ytan medan termometrarna var nedförda till ca 2 cm djup i jordarten.

Termovisionskamera
beräknad skenbar
temperatur I_0
(28 min.)



Figur 37 a-b. Jämförelse mellan beräknad skenbar temperatur (I_0) från termovisionsmätning och uppmätt temperatur (termometer) för jordarter med olika vattenhalt och simulerad dygnsamplitud.

10. RESULTATSAMMANFATTNING OCH DISKUSSION

De genomförda klimatkammarförsöken har visat att små temperaturskillnader i markytan kan mätas med termovisionsutrustningen. En mycket god korrelation har erhållits vid jämförelse mellan temperaturmätningar med termometrar/termoelement och beräknade isoternivåer med utgångspunkt från termovisionsmätningar.

Goda förutsättningar finns för att mäta temperaturen även på naturliga markytor. Vid oregelbundna terrängförhållanden bör korrigeringar göras för variationer i lokalklimat. Exempel för hur detta kan göras redovisas av Lundén (1977). Om termovisionsregistreringen genomförs på större avstånd än 10-20 m bör korrektion för atmosfärens dämpning göras. För detta ändamål har tabeller tagits fram, AGA (1973). De objekt som registreras i naturen måste framträda med en storlek av minst ca 2.5 mm på bildskärmen, annars blir den avlästa temperaturskillnaden mot bakgrunden för liten. Eftersom emissionsfaktorn är vinkelberoende bör ej registreringar göras mot ytor med större vinkel än 50° mot normalen.

Vid simulerade utströmningsförsök har temperaturskillnader, beroende på variationer i bräddnivå, dokumenterats både med konventionella termperaturmätningar och med termovisionskameran. Även med relativt liten temperaturskillnad (ca $3-5^{\circ}\text{C}$) mellan omgivningstemperatur och "genomströmmande" vatten har mätbara skillnader i yttemperatur kunnat påvisas. Jordarternas yttemperatur har minskat med ytligare bräddnivå.

De genomförda försöken visar att förutsättningar finns för att lokalisera naturligt utströmmande grundvatten, s k utströmningsområden. En grundförutsättning är att grundvattentemperaturen eller marktemperaturen inom utströmningsområdet avviker från omgivningen, dvs markområden som ej påverkas av grundvattnet. Optimala förhållanden för lokalisering av dessa områden torde föreligga dels under vintern, dels under sommaren när marktemperaturen är hög. En annan

förutsättning är att markytan ej helt avskärmas av täckande vegetation.

Termovisionsregistreringar och konventionella temperaturmätningar har också utförts på jordarter med olika högt stående grundvattennivåer och olika vattenhalter, från torr till vattenmättad jordart. Registreringar som utförts på jordarter med olika grundvattennivåer visar att såväl temperaturamplituden som maximala temperaturen i ytan minskar med ökande grundvattennivå eller vattenhalt. Sambandet mellan temperatur och grundvattennivå har påvisats både med konventionella temperaturmätningar och beräkningar med utgångspunkt från uppmätta isotermnivåer med termovisionskameran.

När försöken påbörjades var en av utgångshypoteserna att markytans temperaturamplitud minskade med ökande vattenhalt, se t ex Idso (1975). De försök som genomfördes med jordarter med varierande vattenhalt (små behållare med 9 olika vattenhalter) visar emellertid att temperaturamplituden ökar vid låga vattenhalter för att vid en viss vattenhalt minska med ytterligare ökande vattenhalt. Totalt genomfördes tre försök av denna typ, varav ett redovisas i denna rapport. Temperaturdata (termometer- och termoelementmätning) från de två övriga försöken uppvisar inte något entydigt kurvförlopp, vilket kan hänföras till de svårigheter som föreligger vid mätning av markytetemperaturen med konventionella mätmetoder.

Under de genomförda försöken förelåg främst problem med att placera termoelementen på samma nivå och på likartat sätt i de olika behållarna. Kalibreringsförsöken visar också att termoelementens kabellängd har betydelse för temperaturvärdets stabilitet. Vid de två senare försöken användes termoelement med kabellängden ca 10 m.

Termovisionsregistreringen från de två sista försöken visar dock att de uppmätta inbördes isotermnivåerna överensstämmer med det försök som redovisas i 8.3. Detta framgår

både av de svart-vita och de färgkodade bilderna.

Klimatkammarförsöken har visat att temperaturspridningen för jordarter med olika vattenhalt är störst för maximumvärdet samt att maximumtemperaturen minskar med ökande vattenhalt. Detta förhållande redovisas också av Idso (1975) som anger två metoder för datainsamling. Den ena metoden avser bestämning av jordarters temperaturamplitud med fjärranalys, den andra avser bestämning av jordartens maxtemperatur med fjärranalys, medan lufttemperaturen bestäms på platsen. De båda metoderna uppvisar enligt Idso (1975) ett rätlinjigt samband i förhållande till markvattenhalten. Dock erhöles en stor spridning i vattenhalt för olika jordarter med samma temperatur. Entydiga kurvsamband erhöles för olika jordarter när temperaturparametrarna plottades mot jordarternas bindningstryck. Eftersom bindningstrycket i en jordart är ett uttryck för vattenhalten föreligger här en möjlighet att skilja ut områden med olika vattenhalt.

Som ovan nämnts erhöles inte ett rätlinjigt samband mellan temperaturamplitud och vattenhalt vid klimatkammarförsöken med simulerad dygnsamplitud och jordarter med olika vattenhalt. I stället erhöles en kurva som i utseende liknar temperaturledningsförmågan för en jordart. Temperaturledningsförmågan för olika jordarter och effekten av denna i detta sammanhang bör belysas genom insamlande av ytterligare data och kontakter med forskare inom det aktuella problemområdet.

De genomförda klimatkammarförsöken har sammanfattningsvis visat att:

- o små temperaturskillnader kan mätas på jordarter med termovisionskameran
- o korrelationen mellan konventionella temperaturmätningar och beräkningar från isotermnivåer uppmätta med termovisionskameran är god

- o temperaturamplituden ökar vid låga vattenhalter in- till ett visst värde, för att sedan minska med ytter- ligare ökande vattenhalt. Temperaturledningsförmågan för en jordart följer samma förlopp i relation till vattenhalten. Det är mycket sannolikt att temperatur- amplituden respektive maximumtemperaturen är direkt proportionell mot temperaturledningsförmågan. Detta samband är principiellt viktigt, då det ej redovisats i den internationella litteraturen.
- o simulerade utströmningsområden har kunnat urskiljas även fast temperaturskillnaden mellan "grundvattnet" och omgivningen varit relativt liten ($3-5^{\circ}\text{C}$)
- o termovisionskameran har detekterat temperaturskill- nader som orsakas av vattenomsättning från minst 10 cm djup
- o behållare med olika vattenhalt har kunnat skiljas från varandra genom variationer i yttemperatur. Korre- lation till vattenhalt kan göras genom att mäta dygnsamplitud eller maximumtemperatur.
- o temperaturmätningar på marken är svåra att göra. En systematisk temperaturdifferens föreligger mellan termo- metrar och termoelement vid de genomförda klimatkammar- försöken. Termoelementens placering, dvs nivå under markytan och kornkontakt har stor betydelse vid tem- peraturmätningen. Eftersom referenstemperaturen upp- mättes med termoelement eller termometer föreligger en viss osäkerhet vid utvärderingen av vilka tempera- turer som termovisionsbilderna representerar.
- o Temperaturfördelningen i klimatkammaren var inte jämn. Temperaturen varierade något både vertikalt och hori- zontellt, vilket kan ha betydelse vid jämförelse mel- lan de olika behållarna.

De genomförda klimatkammarförsöken har inte resulterat i en direkt användbar metod för kartering av markvattenhalt.

De resultat som hittills framkommit visar emellertid att det praktiskt borde vara möjligt att

- o lokalisera utströmningsområden på naturmark
- o lokalisera utströmningsområden i vatten
- o urskilja vattenhaltsvariationer på homogena ytor
- o det torde också vara möjligt att lokalisera läckor på ledningssystem om temperaturskillnaden mellan utläckande vätska och omgivningen är tillräckligt stor. En förutsättning är dock att ej för stora termiska störningar finns nära läckagepunkten.

De genomförda klimatkammarförsöken visar också att en rad problem föreligger innan metoden till fullo kan utnyttjas, dessutom har inte alla frågeställningar kunnat belysas.

- o emission

För att kunna göra exakta beräkningar måste emissionen på den registrerade ytan vara känd. Emissionsvariationen är dock relativt liten för jordarter och skiljer sig inte alltför mycket från vegetationen. Emissionen varierar också beroende på jordartens vattenhalt. Detta torde ha mindre betydelse i detta sammanhang. Om temperaturskillnaden är stor mellan registrerade föremål har emissionsfaktorn mindre betydelse

- o vegetation, humus

Vegetationens och humusens inverkan på markens termiska egenskaper bör belysas. Vegetationen i sig själv varierar också i temperatur. Ett annat problem är att vegetationen i vissa fall avskärmar från insyn. Många gånger torde det dock vara tillräckligt att registrera öppna ytor mellan slutna bestånd. En möjlighet är att göra registreringen vid en tidpunkt då lövträden är kala.

- o Termovisionskamerans prestanda och upplösning på större avstånd och under fältmässiga förhållanden har ej klarlagts.

Under klimatkammarförsöken insamlades en stor mängd data. I denna rapport har en del av dessa redovisats. Ej redovisade data har arkiverats på geologiska institutionen. Samtliga temperaturmätningar har plottats och lagrats på institutionens Hp-dator. Termovisionsregistreringarna finns tillgängliga i form av polaroidkort. På grund av trycktekniska och ekonomiska orsaker har några färgregistreringar inte presenterats i denna rapport.

11. REFERENSER

- Adams, W., Lepley, L., Warren, C., Chang, S. 1970.
Costal and Urban Surveys with IR, Photogrammetric
Engineering, Volym XXXVI, Feb 1970.
- AGA, - Termovision 750. Operation manual. Publication 556.
408, 1973.
- Termovision 750. Trycksak 556.437. AGA Infrared
Systems AB 1976.
 - Termovision 750. Tillbehör. Trycksak 556.438.
AGA Infrared Systems AB 1976.
 - Termovision 750. Colour monitor 556. 424.
AGA Infrared Systems AB 1974.
- Ahlsell, IR, 1978. Silversand, Industriråvaror A-3-06-78.
- Blanchard, M.B. Greeley, R., Goettelman, R. 1974. Use of
Visible, Near-infrared and Thermal Infrared Remote
Sensing to Study Soil Moisture. Nasa TM X62.
- Christensen, L. 1974. Infrarød stråling benyttet til
Remote Sensing - Fjernanalyse, Geografisk Orientering
nr.6, 4. årgang, 1974.
- Danfors, Lundén, Svensson, Wastenson, 1977. Markvatten-
kartering medelst IR-termografi. Preliminär rapport
från en studie i Vibydalen, Vallentuna. Meddelande
3:22A, Institutionen för kulturteknik, Tekniska Hög-
skolan, Stockholm.
- Ericsson, L-O, Holmstrand, O. 1978. Vattnets rörelse i den
omättade zonen, mätmetoder - Litteraturgenomgång.
Byggeforskningen, rapport R4:1978.
- Ericsson, L-O., Hård, S., 1978. Registrering av vattenhal-
ten i markytan med hjälp av termovisionskamera.
Publ. B111. Geologiska institutionen, Chalmers tekniska
högskola, Göteborgs universitet.
- Fitzgerald, E., 1974. Multispectral Scanning Systems and
their potential Applications to Earth Resources
Systems, ESRO-CR-232.
- Idso, S.B., Schmutge, T.J. Jackson, R.O., Reginato, R.J.,
1975. The Utility of Surface Temperature. Measurements
for the Remote Sensing of Surface Soil Water Status.
Journal of Geophysical Research, Vol. 80., No. 21.
- Lundén, B., 1977. Infrarödtermografi för markvattenstudier.
Forskningsrapport 25, Naturgeografiska institutionen.
Stockholms universitet.

Modin, B., 1979. Förstudier av byggnadsuppvärmning med jordvärmepump, Geologiska faktorer. Rapport R55:1979, Byggeforskningen.

Myers, V.J., Heilman, M.D. 1969. Thermal Infrared for Soil Temperature Studies, Photogrammetric Engineering, Okt. 1969.

Oljelund, M., 1980. Termisk registrering, en metod att kartera markvattenhalt - sedd ur fysikalisk synvinkel. Projektarbete, Geofysik, 5 p. Geologiska institutionens publikation D47, LTH, GU.

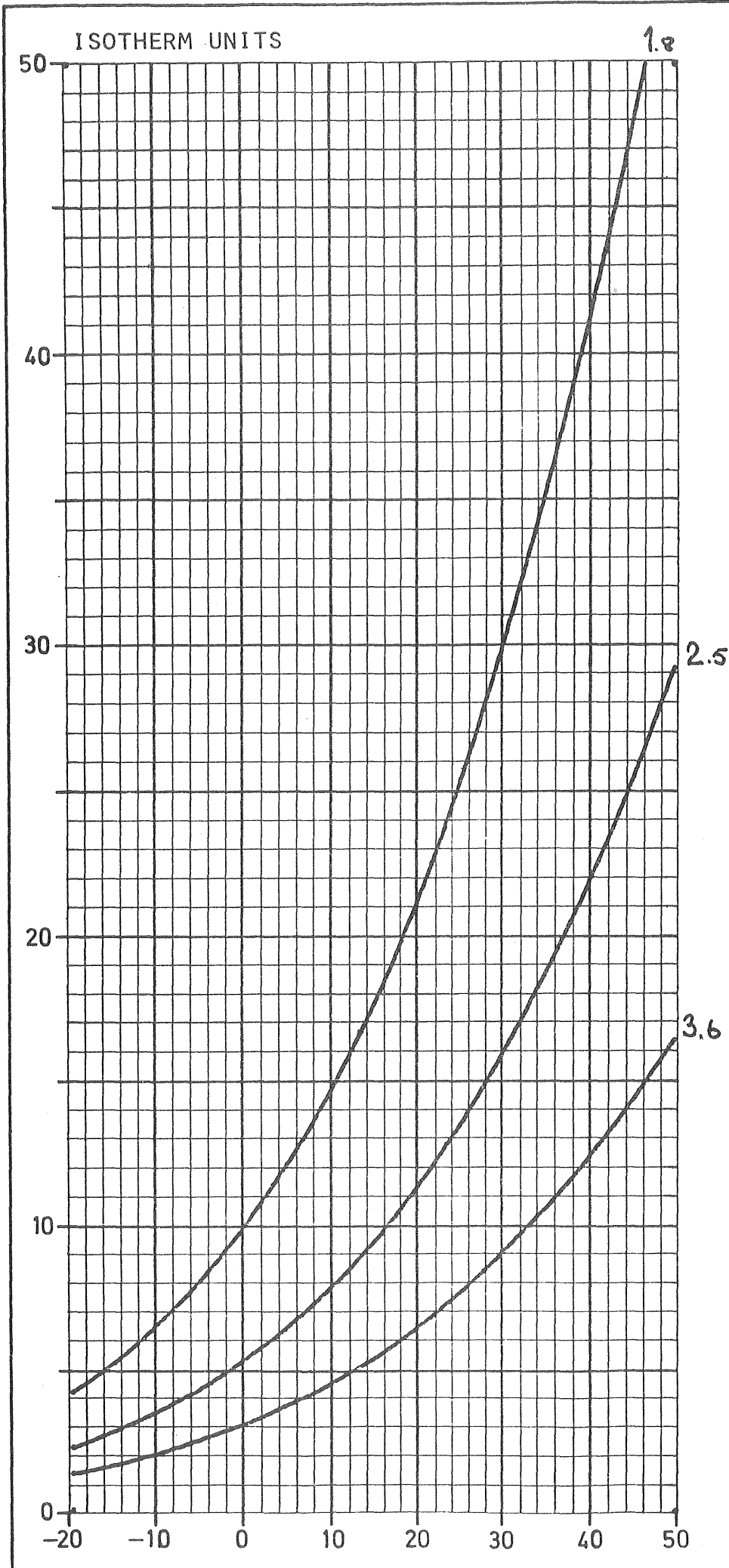
Stenberg, L., 1977. Energiutbytet mellan atmosfär och markyta i samband med tjälnedträngning. En litteraturöversikt. Statens väg- och trafikinstitut (VT1). Rapport Nr 113. Linköping 1977.

Viberg, L., 1980. Användning av termografi för geohydrologiska studier. Pilotförsök i Göta älvs dalgång 1978-08-23. Statens Geotekniska Institut 1980-01-15.

AGA THERMOVISION 750

INDIVIDUAL CALIBRATION CURVES
CAMERA SERIAL NO. 2087 FILTER -

BILAGA 1



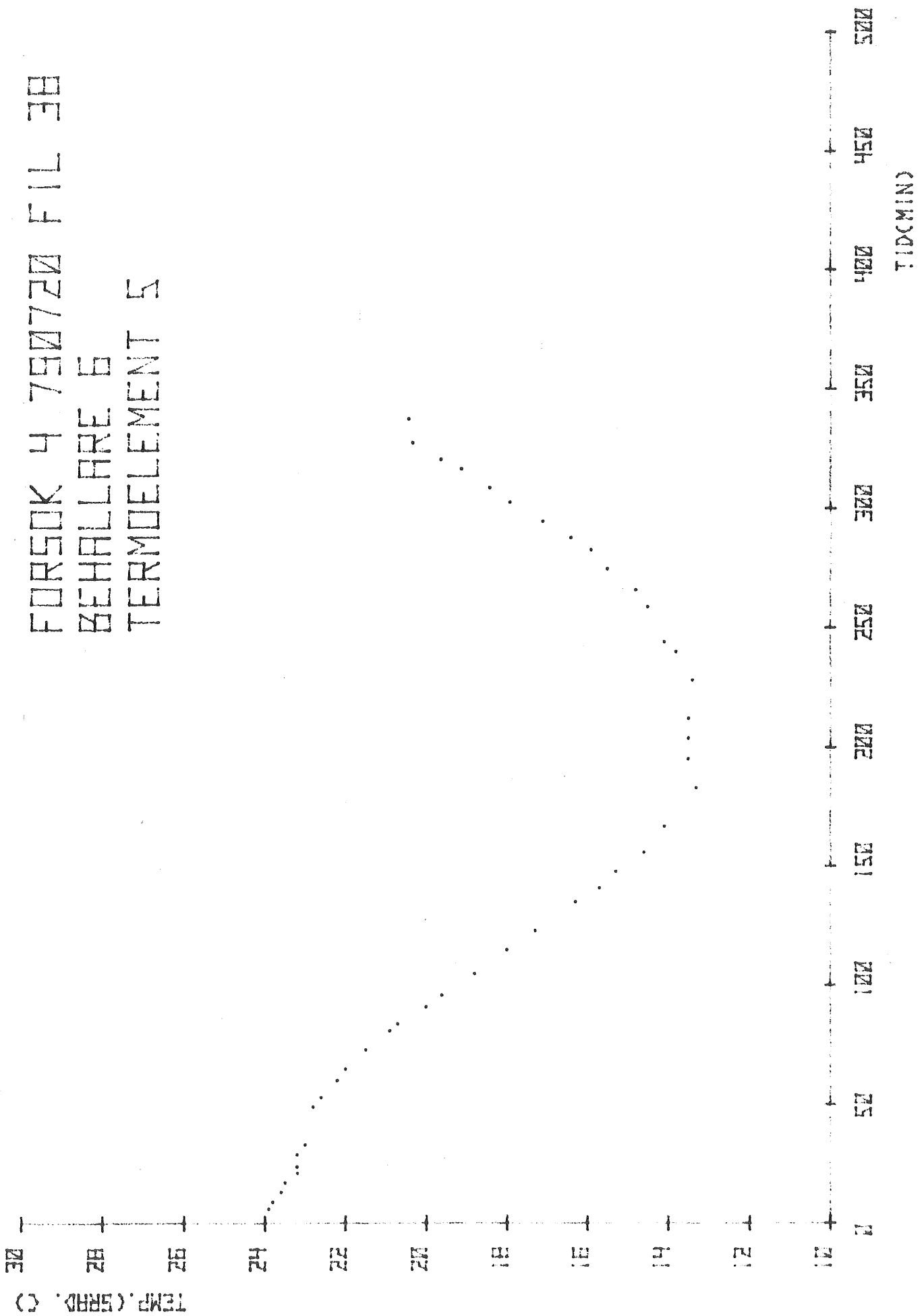
CALIBRATION CONDITIONS

AMBIENT TEMP.	25	°C	TEMPERATURE IN	°C
RELATIVE HUMIDITY	60	%	CO ₂	300 ppm
AIR PRESSURE	766	MM HG	OBJECT DISTANCE	1 M
			DATE	7/20/20 SIGN 20

SERIAL NUMBERS

CAMERA	2087	OBJECTIVE	20/0003
DISPLAY	2087	FILTER	-
DETECTOR	J 2031		

FORSOK 4 790720 FIL 3B
BEHALLARE 6
TERMOELEMENT 5



FORSOK 5 790904 FIL 70
BEHALLARE 2
TERMOMETER 2

