



CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
GEOHYDROLOGISKA FORSKNINGSGRUPPEN

Geologi
Geoteknik med grundläggning
Vattenbyggnad
Vattenförsörjnings- och avloppsteknik

ISSN 0347 - 8165

MORÄNSTRUKTUR OCH HYDRAULISK KONDUKTIVITET

**THE INFLUENCE OF SEDIMENT STRUCTURES ON HYDRAULIC
CONDUCTIVITY IN TILL - PROGRESS REPORT 1**

Bo Lind Mats Nyborg



CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
GEOHYDROLOGISKA FORSKNINGSGRUPPEN

Geologi
Geoteknik med grundläggning
Vattenbyggnad
Vattenförsörjnings- och avloppsteknik

ISSN 0347 - 8165

MORÄNSTRUKTUR OCH HYDRAULISK KONDUKTIVITET

**THE INFLUENCE OF SEDIMENT STRUCTURES ON HYDRAULIC
CONDUCTIVITY IN TILL - PROGRESS REPORT 1**

Bo Lind

Mats Nyborg

Adress : Geohydrologiska forskningsgruppen
Chalmers tekniska högskola
412 96 Göteborg
Tel. 031/81 01 00/1648

FÖRORD

Denna rapport behandlar strukturförhållanden i morän samt deras inverkan på den hydrauliska konduktiviteten. Rapporten utgör en redovisning av första årets arbete inom projektet "Jordartsstrukturens betydelse för hydraulisk konduktivitet hos morän". Tonvikten i rapporten ligger på redovisning av problemställningar samt arbets- och analysmetoder.

Projektet bedrivs vid Geologiska institutionen och ingår i Geohydrologiska forskningsgruppens verksamhet. Projektet finansieras av Byggforskningsrådet.

Göteborg i juli 1985

Bo Lind Mats Nyborg

INNEHALL

	sid
FÖRORD	i
INNEHÅLLSFÖRTECKNING (Contents)	ii
SAMMANFATTNING OCH SLUTSATSER (Summary and conclusions)	iii
SUMMARY AND CONCLUSIONS	iv
1 BAKGRUND OCH PROBLEMSTÄLLNINGAR (Background and relevant problems)	1
1.1 Hydraulisk konduktivitet (Hydraulic conductivity)	1
1.2 Strukturfaktorer (Structure factors)	2
1.2.1 Kornform (Grain shape)	2
1.2.2 Porform (Pore shape)	4
1.2.3 Kornens rundning (Grain roundness)	7
1.2.4 Kornens ytstruktur (Grain surface structure)	7
1.2.5 Aggregatbildning (Aggregates)	8
1.2.6 Kornorientering (Fabric)	9
1.2.7 Porositet-pororientering-porfördelning (Porosity-pore orientation - spacial pore-size variations)	12
1.2.8 Kornfördelning (Spacial grain-size variations)	14
1.2.9 Mineralogi (Mineralogy)	15
2 FÄLTUNDERSÖKNINGAR (Investigations)	16
2.1 Målsättning (Purpose)	16
2.2 Försöksområde (Investigation site)	17
2.3 Försöksområdets geologi (Geology of test area)	18
2.3.1 Berggrund (Bedrock)	18
2.3.2 Kvartära bildningar (Quaternary formations)	20
3 ARBETSMETODIK (Working and analysis methods)	22
3.1 Inledning (Introduction)	22
3.2 Provtagning (Sampling)	22
3.3 Permeameter-test (Permeameter tests)	23
3.4 Bestämning av moränens vattenhållande egenskaper (Investigation of water retention characteristics)	26
3.5 Inplastning av moränproverna (Treatment of till samples)	28
3.6 Tunnslip (Preparation of thin sections)	30
3.7 Spänningsförhållanden i morän (Tensional conditions in till)	33
4 RESULTS (Results)	34
4.1 Textur (Texture)	34
4.2 Kompaktdensitet och skrymdensitet (Density of particles and bulk density)	34
4.3 Hydraulisk konduktivitet (Hydraulic conductivity)	37
4.4 Resultat av tunnslipsanalys (Thin-section analysis)	40
4.5 Kemiska analyser (Chemical analyses)	42
4.6 Lerminarologisk undersökning (Identification of clay minerals)	44
5 RESULTAT (References)	47

SAMMANFATTNING OCH SLUTSATSER

Metodik för provtagning, strukturanalys och beskrivning av ostörda moränprov har framtagits och testats. De genomförda mätningarna och analyserna visar att den uppställda hypotesen (figur 8) kan verifieras, dvs det finns en mätbar skillnad i hydraulisk konduktivitet som beror av de ingående kornens orientering (fabric). Preliminärt kan skillnaden i hydraulisk konduktivitet i olika horisontella riktningar, på de moränprover som studerats, uppgå till omkring en faktor 5.

Förutom kornorientering finns en rad andra strukturfaktorer som påverkar den hydrauliska konduktiviteten. Mycket lite är ännu känt om storleken av de olika strukturfaktorernas inverkan. I ett försök att bena upp problemställningarna kan man utgående från litteraturstudier uppställa nedanstående preliminära tabell, som kan betraktas som en hypotes för det fortsatta arbetet. Strukturfaktorerna nedan är inbördes starkt kopplade till varandra på ett sådant sätt att de inte kan adderas. Den slutsats man kan dra är ändå att strukturen har signifikant inverkan på den hydrauliska konduktiviteten.

Strukturfaktor OBS! faktorerna gäller oberoende av kornstorlek och sortering	Största faktor på in- verkan på den hydrau- liska konduktiviteten (mkt prel. värden)
Kornform	$\cong 5$
Porform (inkluderar sprickor)	starkt varierande
Kornens rundning	?
Kornens ytstruktur	$\cong 5?$
Aggregatbildning	$\cong 5$
Kornorientering	$\cong 5-10$
Porositet-pororientering-porfördelning	?
Kornfördelning	signifikant
Mineralogi	signifikant

SUMMARY AND CONCLUSIONS

The hydraulic conductivity properties of soft sediments are in many cases of great importance in hydrogeological science as well as in practical engineering geology (soil stability, infiltration, drainage, frost heave, wells, covering of wastes). At the same time it is clear that the sediment properties are usually the weakest "link" in the input data for hydrogeological calculations.

The main purpose of this project is to determine the influence of different sediment structures on hydraulic conductivity in till. The project is sponsored by the Swedish Council for Building Research and carried out within the Urban Geohydrology Research Group at Chalmers University of Technology. This state-of-the-art report mainly presents the background of the project and the sampling and analysis methods.

Methods for collecting, analysis and description of undisturbed till samples have been worked out. Preliminary results show that there is a notable difference in hydraulic conductivity due to fabric variation. Besides fabric there are many other factors affecting the hydraulic conductivity. Although very little is known about these factors an attempt has been made to quantify the influence. The structural factors listed below are closely interrelated in a way that the factors of influence cannot be added. Nevertheless, it is possible to state that sedimentary structures have a significant influence on the hydraulic conductivity.

Structure factor

Note, the factors do not consider the grain-size and sorting.

Maximum factor of influence on hydraulic conductivity (very preliminary values)

Grain shape (sphericity)	$\cong 5$
Pore shape (incl. fractures)	strongly varying
Roundness	?
Surface structure	$\cong 5?$
Aggregate occurrence	$\cong 5$
Fabric	$\cong 5-10$
Porosity-pore orientation - spatial pore-size variations	?
Spatial grain-size variations	significant
Mineralogy	significant

1 BAKGRUND OCH PROBLEMSTÄLLNINGAR

1.1 Hydraulisk konduktivitet

Hittills använda formler för indirekt beräkning av specifik permeabilitet och hydraulisk konduktivitet utgår ifrån att man har försökt hitta samband mellan porvolymen och genomsläppligheten. Följande enkla samband har härletts för den hydrauliska konduktiviteten (Todd, 1959)

$$K = C \cdot d^2 \cdot (\rho g / \mu) \quad (1)$$

där K = hydrauliska konduktiviteten (m/s)

C = konstant, empiriskt bestämd (dimensionslös)

d = karakteristiska flödesutrymmet, porstorleken (mm)

ρ = vätskans densitet (kg/m^3)

g = tyngdkraftsaccelerationen (m/s^2)

μ = vätskans dynamiska viskositet (Ns/m^2)

Emellertid har bland andra Gustafson (1983) visat att det inom vissa kornstorleksintervall råder ett direkt samband mellan porstorlek och kornstorlek. Detta förhållande innebär att man i stället för porstorlek kan ange en karakteristisk kornstorlek, något som bl a utnyttjas i den välkända Hazen's formel:

$$K \text{ (m/s)} = 1.157 \cdot 10^{-4} \cdot d_{10}^2 \text{ (mm)} \quad (2)$$

Om $d_{60}/d_{10} \leq 5$

där d_{10} = kornstorleken för 10 viktsprocent passerande mängd enligt kornstorleksanalys

d_{60} = kornstorleken för 60 viktsprocent passerande mängd enligt kornstorleksanalys

I generell form och utan hänsyn till vätskans egenskaper kan den specifika permeabiliteten anges som

$$k = C \cdot d^2 \quad (3)$$

Om d i denna formel är ett mått på kornstorleken står konstanten C för alla övriga faktorer som påverkar genomsläppligheten, nämligen:

kornform (sfäricitet)
 porform
 kornens rundning
 kornen ytstruktur
 aggregatbildning (storlek, form)
 kornorientering
 porositet-pororientering-porfördelning
 kornfördelning
 mineralogi.

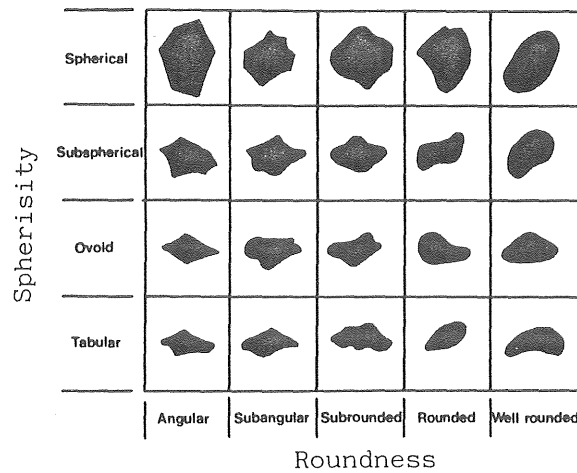
De flesta, möjligen med undantag av Fair & Hatch (1933) av de empiriskt uppställda permeabilitetsformlerna har ej förmågan att skilja ut och ta hänsyn till asymmetri i ovanstående faktorer. I stället är de empiriska formlerna uppställda och giltiga för isotropa och relativt väl sorterade jordarter.

Det är väl känt att morän ofta har utpräglad asymmetrisk struktur, framför allt genom mikrosprickor (foliation), skiktningar, och partikelorientering (fabric). Även i övrigt förekommer vanligen större eller mindre asymmetri med avseende på ovanstående faktorer. En enhetlig struktur kan uppträda i en moränfacies avsatt över ett stort område. Det finns därför anledning att studera om asymmetri i jordartsstrukturen ger upphov till motsvarande anisotropi hos permeabiliteten. Ämnesområdet har tidigare berörts bl a i en intressant rapport från Norge, Dahl et al (1981).

1.2 Strukturfaktorer

1.2.1 Kornform

Med kornformen avses det geometriska förhållande mellan en partikels a (längd)-, b (bredd)- och c (tjocklek)-axlar. Direkta mätningar är vanligen alltför tidsödande för praktiskt bruk och i stället finns flera system för optisk angivelse av kornformen. En enkel metod som framgår av figur 1 bygger på en tvådimensionell projicering av partiklarna mot ett plan utsträckt i riktningarna a och b enligt partikelaxlarna.



Figur 1 Rundnings- och sfäricitetsklasser (ur FitzPatric, 1984).

Roundness and sphericity classes (from FitzPatric, 1984).

Den permeabilitetsformel (4) som uppställts av Fair & Hatch (1933) utgår huvudsakligen från karakteristisk kornstorlek. Fair & Hatch har dock infört en speciell faktor, Θ , för kornformen som de anger till 6.0 för sfäriska korn och kan uppgå till 7.7 för avlånga korn.

$$K = \left(\frac{\rho g}{\mu} \right) \left(\frac{n^3}{(1-n)^2} \right) \left(\frac{1}{m \left(\frac{\Theta}{100} \sum \frac{P}{d_m} \right)^2} \right) \quad (4)$$

ρ = vätskans densitet

g = tyngdkraftsaccelerationen

μ = vätskans dynamiska viskositet

n = porositet

m = packningsfaktor (empiriskt bestämd till ≈ 5)

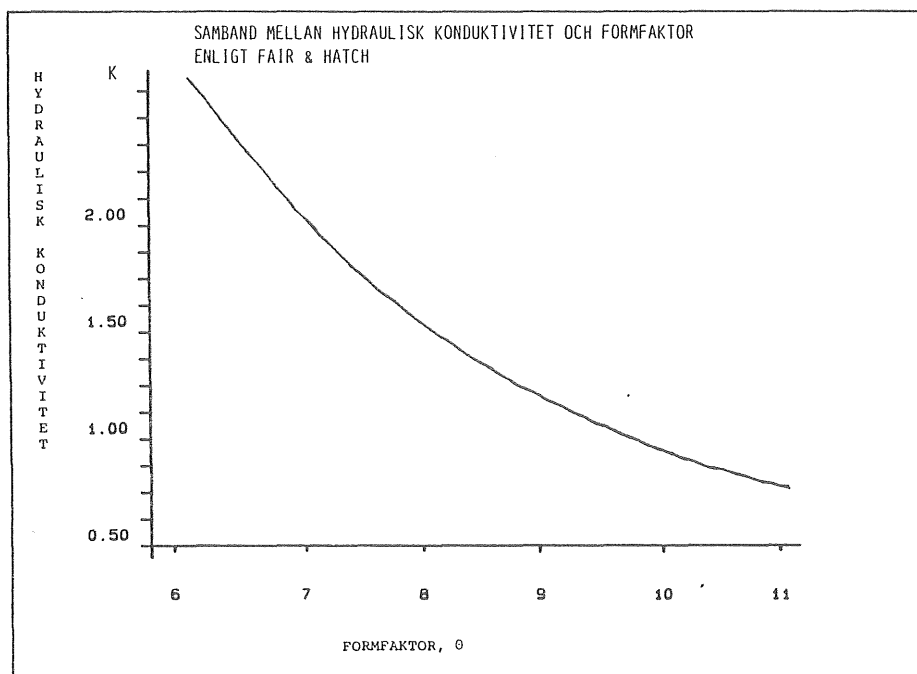
Θ = kornformfaktor

P = viktsprocent material mellan närliggande siktar

d_m = geometriska medelvärde av närliggande siktar

New York DOT (1973) anger också en motsvarande korrektionsfaktor för kornformen. För runda glaspärlor anges $\Theta=6$ och för krossat glas $\Theta=10.8$.

Faktorn Θ ingår i Fair & Hatch permeabilitetsformel på ett sådant sätt att ökande Θ ger minskande K , se figur 2. Vi ser alltså att t ex glaspärlor ger högre permeabilitet än krossat glas vid motsvarande partikelstorlek. Detta förhållande är emellertid inte helt entydigt, vilket framgår under rubriken "Kornens rundning".



Figur 2 Samband mellan kornformfaktorn Θ och hydraulisk konduktivitet K beräknad med Fair & Hatch formel. Högre värden på formfaktorn innebär mindre sfäriska och mera kantiga korn.

The relation between grain shape factor Θ and hydraulic conductivity K calculated with Fair & Hatch formula. Higher Θ -values mean greater tabularity and angularity.

1.2.2 Porform

Såväl de enskilda porernas utseende som hela porsystemets samband varierar mellan olika jordarter. Porernas utseende i glacio-fluviala grus- och sandsediment skiljer sig från porerna i t ex en mullhaltig diamikton jordart. Hydrauliska konduktiviteten är bl a beroende av strömningsförhållandena i de enskilda porerna och givetvis också av sambandet mellan porerna och utvecklingen av strömningskanaler.

Man skiljer på diskreta porer med kontinuerligt samband till ett flödesutrymme och indiskreta porer som är isolerade. I praktiken kan det vara mycket svårt att skilja mellan diskreta och indiskreta porer. Problemet är dock aktuellt huvudsakligen i lerjordar och jordar med hög organisk halt. I diamiktona - och övriga friktionsjordarter har porer större än $0.2 \mu\text{m}$ normalt ett hydrauliskt samband, vilket bl a utnyttjas vid bestämning av volymetrisk vattenhalt vid olika undertryck (pF-mätning). Den porvolym där strömning sker, dvs den effektiva porositeten, är inte enbart beroende av sammanhängande strömningskanaler utan också av den för tillfället rådande hydrauliska gradienten.

Fitzpatrick (1984) har från tunnslipsanalys beskrivit sex typer av diskreta porer. Inom de finare fraktionerna, silt-ler, (odlingsjord med aggregatstruktur) har Currie (1979) med hjälp av vätgasdiffusion definierat en formfaktor, ϵ , för de partiklar som omger porerna.

I jordar där de enskilda partiklarna bygger upp aggregat anges ϵ i stället som en faktor för porkomplexiteten. Currie anger att ϵ för många material är oberoende av porositeten. För de skilda odlingsjordar som redovisas varierar ϵ mellan ca 5-20. Detta motsvarar ungefär samma variation (dvs ca 4 gånger) i porernas gastransportförmåga, porositeten oaktad.

$$\epsilon = \frac{n}{1-n} \cdot \frac{1-(D/D_0)}{D/D_0} \quad (5)$$

ϵ = porkomplexitet

n = porositet

D = diffusionskonstanten i mediet

D_0 = diffusionskonstanten i luft

I ett försök att urskilja olika jordartsfaktorerers betydelse för de vattenhållande egenskaperna har Williams et al (1983) visat att förutom texturen så hade också förekomsten av aggregat samt jordartens struktur signifikant inverkan. Strukturen delades in i tre klasser, svag, måttlig, stark och innefattar aggregatans form samt andra egenskaper studerade i fält enligt Butler (1955). För

de australiensiska vittringsjordar som undersöktes fastslås således att det föreligger en stark association mellan jordartens struktur (i stor utsträckning knuten till aggregatbildningen) och de vattenhållande egenskaperna.

Till jordartens porsystem hör också sprickbildningen. Sprickor i morän är förhållandevis lite beskrivet i litteraturen. Både från England (McGrown et al, 1974; Al-Shaikh-Ali, 1981), USA (Hendry, 1982) och från Norge (Dahl et al, 1981) finns dock beskrivningar av såväl horisontella som vertikala spricksystem i morän. Sprickbildning förekommer främst i leriga moräner och de mest markerade spricksystemen uppträder parallellt med markytan. De beskrivna sprickavstånden är på 1 m djup vanligen 10-30 mm och ökar mot djupet. Sprickornas uthållighet anges från 10 mm till över 1 m. Det tycks dock som de stora sprickorna, med vidd 10 mm eller mer, har brant mer eller mindre vertikal stupning.

I svensk, naturligt avsatt morän är stora, för ögat synliga, öppna sprickor med lång uthållighet mycket sällsynta. I stället förekommer ibland ett mikrosprickmönster av mer eller mindre separata och till synes slutna sprickor. Det hydrauliska sambandet mellan sprickorna är inte studerat och mikrosprickmönstrets uthållighet och betydelse för den hydrauliska konduktiviteten är i stort sett okänd.

Specifika permeabiliteten k i ett uppsprucket medium där matrix förutsätts vara mycket tätt kan beräknas t ex enligt Snow's (1969) ekvation (6).

$$k = \frac{2}{3} \frac{1}{\Delta} \sum \frac{b^3}{N} \quad (6)$$

Δ = medelsprickavstånd

b = halva sprickvidden

N = antalet uppmätta sprickor inom den studerade arean

Om sprickavståndet inte är känt kan man i stället ange en total flödesvidd, w . Då blir

$$k = \frac{2}{3} \frac{1}{w} \sum \frac{b^3}{N} \quad (7)$$

1.2.3 Kornens rundning

Rundning förväxlas ibland med kornform. Med rundning avses kanternas avrundning. Det kan uttryckas som kvoten mellan medelradien på hörnen och radien på den största sfären som kan inskrivas i partikeln. I praktiken används vanligen ett jämförande visuellt system i två plan vid angivande av rundning, se figur 1.

Litet är känt om rundningens inverkan på permeabiliteten. Fraser (1935) anger att väl rundade partiklar packas tätast och att porutrymmet ökar med minskande rundning. Man kan då förvänta sig ökande permeabilitet med minskande rundning hos kornen, vid i övrigt lika storleks- och packningsförhållande. Detta går emellertid stick i stäv med den kornformfaktor som ingår i Fair & Hatch permeabilitetsformel, se kapitel 1.2.1. Förklaringen kan ligga däri att kornformfaktorn hos Fair & Hatch även omfattar faktorer som packning och sorteringsgrad. Det skall dock påpekas att mycket få försök med systematiska packnings- och permeabilitetsstudier med varierande rundning finns genomförda.

1.2.4 Kornens ytstruktur

Flödesfriktionen i jord är bl a beroende av jordpartiklarnas ytstruktur, dvs polering, råhet, slagmärken etc. Mycket lite är känt angående inverkan på hydrauliska konduktiviteten och flödesegenskaperna. Några idéer kring problemet och kanske också vissa användbara infallsvinklar kan man dock få från hydrauliken. Här har man behandlat problematiken framför allt i form av ytråheten, vanligen uttryckt genom Mannings råhetskoefficient, n , i Mannings formel, (8):

$$v = 1.49 \frac{R^{2/3} s^{1/2}}{n} \quad (8)$$

v = flödes hastigheten i en kanal

R = hydrauliska radien = $A/(2d+w)$

A = tvärsnittsarea

d = flödesdjup

w = flödesbredd

s = flödesgradienten

Mannings råhetskoefficient har empiriskt bestämts för olika miljöer.

Mannings råhetskoeff. n	
Slät glasyta	0.010
Rak kanal i jord	0.020
Blockrik och vindlande bergsflod	0.050

Mannings tal, n , har tagits fram empiriskt för olika miljöer och är approximativt behandlad som en konstant, oberoende av flödesgradienter, kanalens vidd eller vattendjup. I själva verket påverkas också n av alla dessa faktorer. I praktiken har det blivit så att n uppskattas i fält vid beräkningar av flödeshastigheter i olika kanaler och floder.

Mannings formel anger således en relation mellan flödeshastighet och ytråhet. Ekvationen är framtagen för turbulenta flöden i öppna kanaler och direkta jämförelser med grundvattenströmning går givetvis inte att göra. Emellertid kan man se att relationen mellan den relativa råheten och flödeskanalens vidd kan vara i samma storleksordning för jordporer som för vattendrag. Som en försiktig hypotes kan det därför var rimligt att anta att kornens ytstruktur i en jordart kan variera och påverka flödet i samma storleksordning som enligt Mannings formel, dvs omkring en faktor 5. I det fortsatta arbetet har vi valt en uppdelning av kornens ytstruktur i fyra klasser.

1.2.5 Aggregatbildning

Aggregatbildning förekommer huvudsakligen i humusrika jordar. Aggregatbildning ökar porositeten, framför allt andelen större porer, och därmed ökar också permeabiliteten. I opåverkad morän är humusinnehållet normalt mycket ringa och någon uttalad aggregatbildning förekommer inte. Däremot uppträder det i moränen ingående leret ofta som väl samlade klumpar eller aggregat. Dessa leraggregat ligger dock vanligen homogent inpackade

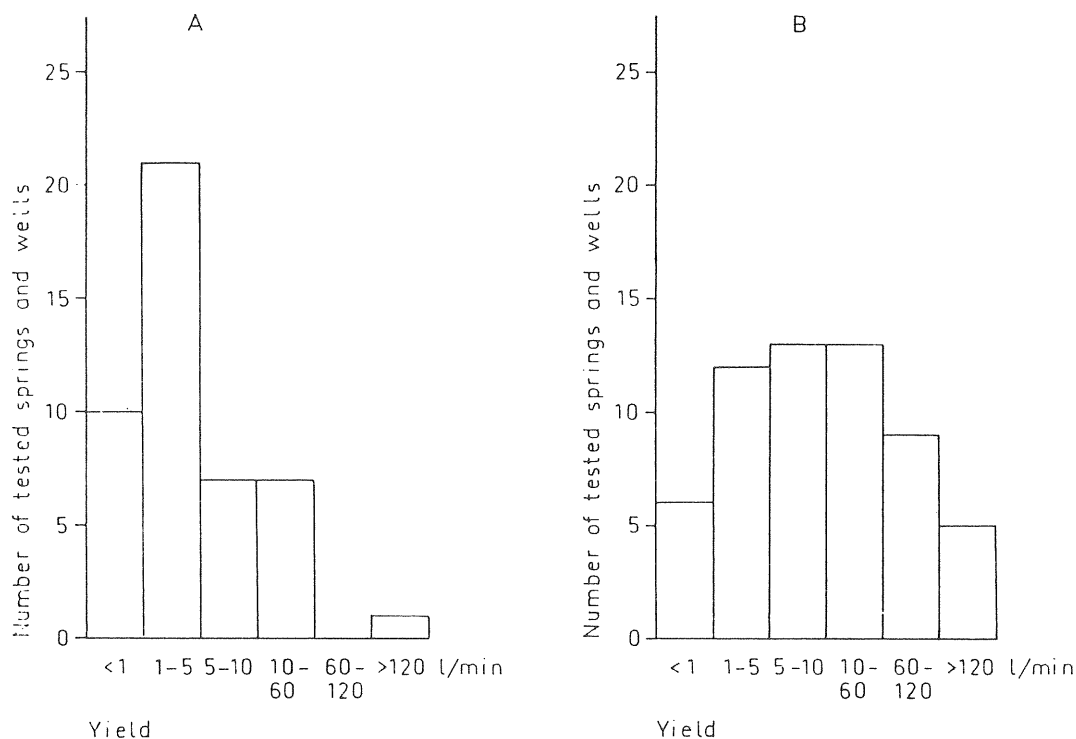
i övrig matrix och ger därför inte en luckrare och porösare struktur åt jordarten. I samband med vätskegenomträngning kan leraggregaten dispergeras och genom kort migration av lerpartiklarna orsaka tätning av kringliggande porer och sänkning av den hydrauliska konduktiviteten. Chen et al (1983) redovisar försök på siltiga och leriga jordar där kalium (K^+)-anrikning i jorden, uttryckt som ökande procenttal utbytbara K^+ -joner, orsakar dispergering av leraggregaten. Chen et al anger att detta är den viktigaste faktorn för minskande hydraulisk konduktivitet i jämförelse med längre finmaterialtransport i jorden. I de tre redovisade försöksserierna minskade den hydrauliska konduktiviteten ungefär med en faktor 5 gånger vid tillsats av kalium.

Det är således känt att aggregatbildning ökar porositeten och permeabiliteten hos en jordart. Om man översiktligt jämför erfarenheter angående porositet och vattenhushållning hos svenska odlingsjordar (se t ex Berglund, 1979) med Chen:s et al resultat kan siffran 5 gånger vara ett rimligt mått på storleksordningen av aggregatbildningens inverkan på den hydrauliska konduktiviteten.

1.2.6 Kornorientering

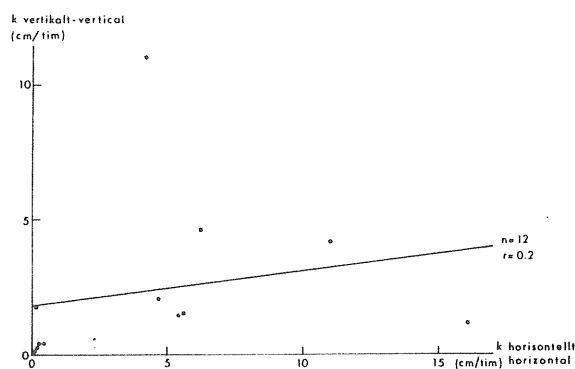
Kornen i morän har vanligen en tendens att orientera sig med sin a-axel (längsta axel) ungefär horisontellt. Detta ger upphov till skikt, "fissility", och lagerytor i horisontell led som ökar den hydrauliska konduktiviteten. Den horisontella kornorienteringen är uttalad framför allt i basalt avsatta moräner och Knutsson (1971) har beskrivit det gynnsammare grundvattenflödet i drumliner jämfört med kullig moränterräng, figur 3.

I en studie av finkornig morän i New York (Prudic, 1982) fann man ett förhållande mellan horisontell och vertikal hydraulisk konduktivitet av 9:1 (10^{-9} resp 10^{-8} m/s). I ett moränområde i Kloten, Bergslagen, har Lundin (1982) uppmätt förhållandet omkring 4:1 mellan horisontell och vertikal hydraulisk konduktivitet, se figur 4. Liknande resultat (5:1) mellan horisontell och vertikal genomsläpplighet har erhållits hos SGI (Statens geotekniska institut) vid infiltrationsförsök på packad morän (Tom Lundgren, muntl. komm.).



Figur 3 Diagram över kapaciteten hos brunnar och källor testade genom korttidsprovpumpning. A = kullig moränterräng; B = drumlinterräng. Drumlinerna har i genomsnitt en jämnare och högre brunnskapacitet än kullig moränterräng (ur Knutsson, 1971).

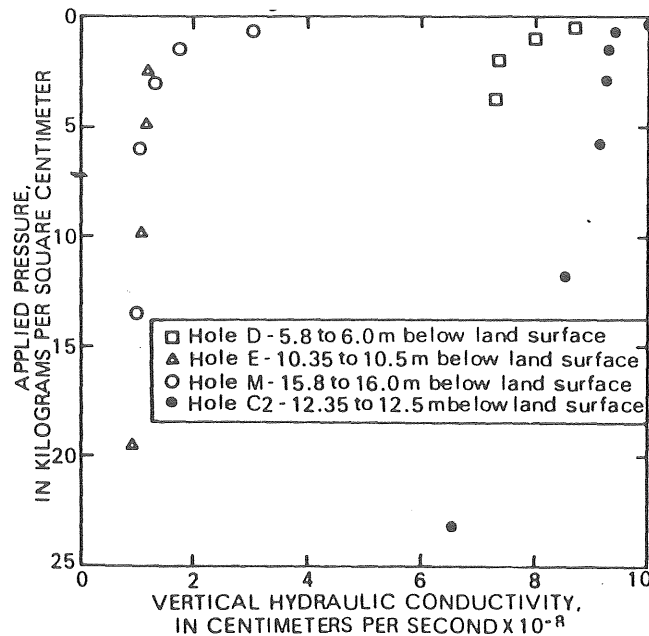
Diagram of the yield of springs and wells determined at a total drawdown by short-term pumping test. A = in hummocky moraine; B = in drumlin terrain (from Knutsson, 1971).



Figur 4 Förhållandet mellan horisontell och vertikal konduktivitet uppmätt i ett moränområde i mellansverige (ur Lundin, 1982).

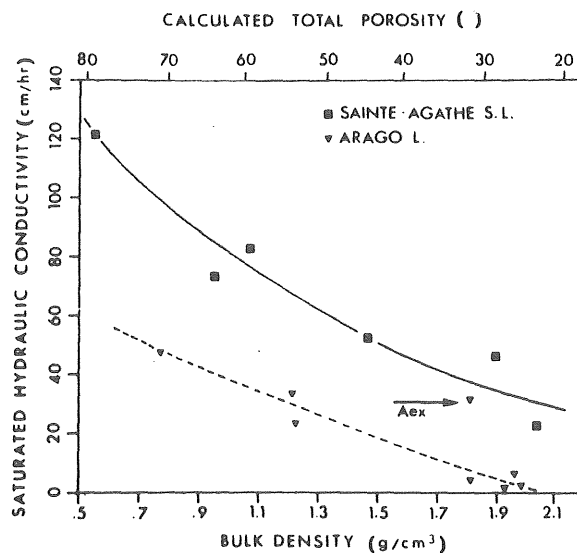
The relation between horizontal and vertical conductivity in a till area in mid Sweden (from Lundin, 1982).

I normalkonsoliderade jordar ökar vertikaltrycket med djupet, vilket tenderar att höja skrymdensiteten och således sänka den hydrauliska konduktiviteten. Sambanden framgår av figurerna 5-7.



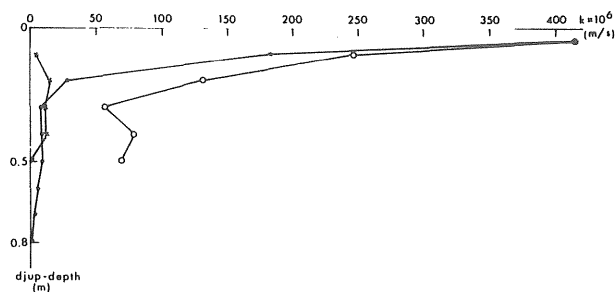
Figur 5 Förhållandet mellan hydraulisk konduktivitet och konsolideringstryck i finkorniga moränprover från Buffalo, östra USA (ur Prudic, 1982).

Relationship of hydraulic conductivity to confining pressure as determined from consolidation tests on fine-grained till samples from Buffalo, east USA (from Prudic, 1982).



Figur 6 Förhållandet mellan skrymdensitet och hydraulisk konduktivitet hos två olika siltiga sandiga moräner från högländet i Quebec, Canada (ur Mehys et al, 1976).

Relationship between bulk density and hydraulic conductivity in samples from two different silty sandy tills in the Highlands of Quebec, Canada (from Mehys et al, 1976).



Figur 7 Hydrauliska konduktivitetens förändring med djupet. Resultat från utspädningsförsök i morän i mellansverige (ur Lundin, 1982).

Variation of hydraulic conductivity with depth in the soil. Results from dilution experiments on till in mid Sweden (from Lundin, 1982).

1.2.7 Porositet - pororientering - porfördelning

Porositeten, porernas orientering och fördelning över en större moränyta, är givetvis starkt knuten till kornens orientering men kan i vissa fall skiljas ut som separata faktorer. Porositeten anges som volymsprocent.

Porositeten i marken kan vara mycket hög i de ytligaste delarna med stor organisk inblandning. På djup under ca 0.5 m övergår jordmånsprofilen vanligen i närmast ren mineraljord med porositeten omkring 30vol%. Lundin (1982) har genom porositetsbestämningar i morän fått resultaten att de största porositeterna återfinns i A_0 -horisonten, dvs markens ytliga förna, med upp till 95% på 0.1 m djup. Porositeten minskar kraftigt från 0.1 m djup till 0.3 m där den är 50%. På nivåer mellan 0.5 och 1 m djup är porositeten omkring 30% för att under 1 m vara mellan 20 och 25%. Undantag utgör blockrika nivåer där porositeten når förhållandevis låga värden.

Av intresse för den hydrauliska konduktiviteten är den effektiva porositeten, n_e , dvs den del av jordvolymen som upptas av porer som är tillräckligt stora för att vatten däri skall flöda vi

den för tillfället rådande hydrauliska gradienten. Den effektiva porositeten varierar vanligen mellan 3-10% vid normalt förekommande gradienter i morän.

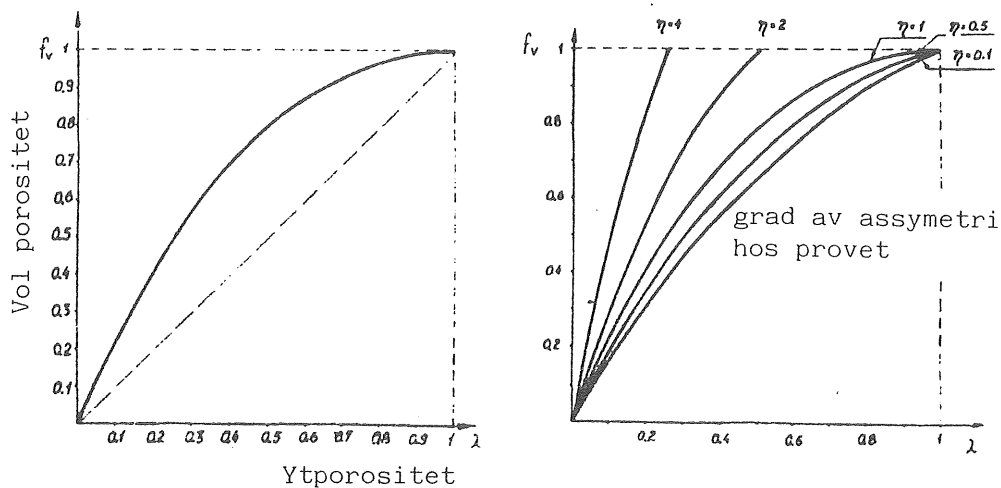
Porositeten och kanske framför allt porfördelningen är starkt beroende av kornens lagring. För jämnstora sfäriska korn gäller att vid kubisk packning, som är den mest öppna strukturen, föreligger en teoretisk porvolym på 46.7%. Vid hexagonal klotpackning, som är den tätaste packningen, är porvolymen bara 25.9%, (Jensen, von Brömsen, 1985). Med en mer ojämn kornform och spridning i kornstorleken som man i praktiken har kommer talen för porvolymern att bli lägre. Vanligen beräknas porstorleksfördelningen indirekt utifrån så kallade pF-mätningar, dvs mätningar av volymetrisk vattenhalt vid olika undertryck. Tre problem är förknippade med detta.

- 1) Genom pF-utrustning erhålls egentligen den minsta poröppningen till porutrymmen och ej den egentliga porvolymen för respektive undertryck.
- 2) Jämförelser har visat att porositeten beräknad från tunnslip ger högre värden än beräkningar gjorda utifrån pF-mätningar (Bullock, Thomasson, 1979).
- 3) Ytporositeten är sannolikhetsmässigt lägre än volymporositeten (Kubik, Rybicki, 1980).

Alla tre punkterna ovan samverkar mot att porvolymsberäkningar utifrån pF-bestämningar ger för låga värden.

I ett isotropt poröst medium är den porositet som skär begränsningsytorna av ett volymelement något lägre än den porositet som volymelementet har i sin porösa struktur. Med hjälp av sannolikhetsberäkningar avseende ett isotropt, poröst medium har Kubik, Rybicki (1980) funnit nedanstående samband mellan yt- och volymporositeten (figur 8). Det framgår att volymporositeten alltid är större än ytporositeten, utom för gränsfallen när porositeten är 0 resp 100%. Den största differensen vid isotropa förhållanden fås för ytporositeten, $\lambda=0.44$ (44%) vilket ger volymporositeten $f_v = 0.72$ (72%). Om dessa beräkningar är riktiga innebär det att

porositeten uppmätt i ytan (t ex i ett tunnslip) ibland kan vara avsevärt mindre än provets egentliga 3-dimensionella porositet.



Figur 8 Samband mellan porositet i ytan av ett volymelement och elementets 3-dimensionella porositet i ett poröst isotropt medium. Teoretiskt beräknat med hjälp av sannolikhetsanalys. (Ur Kubik, Rybicki, 1980)

Relationship between porosity at the surface and 3-dimensional volume-porosity of an isotropic porous sample. Theoretical probability calculations (from Kubik, Rybicki, 1980).

Sammanfattningsvis blir slutsatsen att det tillgängliga flödesutrymmet normalt kan variera med en faktor 2-3 gånger i friktionsjordarter.

1.2.8 Kornfördelning

Med kornfördelningen menas hur kornen är ordnade i en jordvolym. I morän är det vanligt att kornen fördelas till en struktur med inslag av mera sorterade lager och linser. Sandiga lager kan stå för huvuddelen av vattentransporten även om dessa endast utgör en mindre del av den totala moränmassan. Inom de sorterade lagren kan dessutom gradering (graded bedding) förekomma med de grövsta kornen i botten och successivt minskande kornstorlek uppåt. En stor del av moräners anisotropi torde ha att göra med kornfördelningen i moränmassan. Haldorsen et al (1983) har i en norsk studie dragit slutsatsen att mer än 90% av vattenströmningen i homogen norsk morän sker i sprickor, mikrosprickor (fissures) och sorterade sedimentskikt.

1.2.9 Mineralogi

Skilda mineral har olika motståndskraft mot erosion och kristallstrukturen ger olika kornformer. Så får t ex korn som i stor utsträckning består av glimmermineral i allmänhet en platt form. Jordartens kornform och därmed också den hydrauliska konduktiviteten är således knuten till mineralogin. I morän och andra diamiktona jordarter är kornskelettet uppbyggt genom flera skilda genetiska processer. Haldorsen (1981) har visat att huvuddelen av sandfraktionen har bildats genom krossning och att uppsprickningen sker i mineralgränserna. Sandfraktioner tenderar att bestå av monomineraliska korn uppspaltade längs de naturliga mineralgränserna. Siltfraktionen däremot bildas huvudsakligen genom malning med brottgränser som skär tvärs igenom mineral.

Den hydrauliska konduktiviteten i en jordart påverkas i hög grad av lerinnehållet. I detta sammanhang är även de skilda lermineralens fysikaliska/kemiska egenskaper betydelsefulla. Framför allt förekomsten av svällande lermineral, smektiter, är av intresse vid beräkningar av den hydrauliska konduktiviteten. Detsamma gäller i viss mån vermikulit och så kallade blandskiktmineral som ibland kan uppvisa svällande egenskaper.

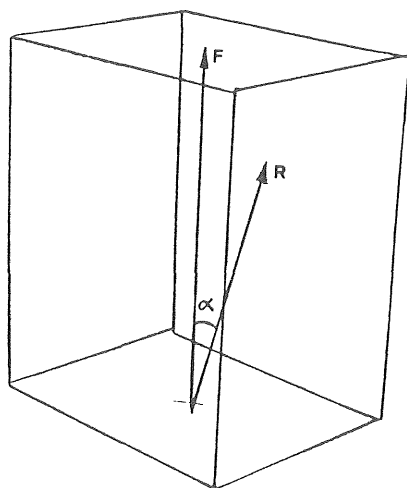
2 FÄLTUNDERSÖKNINGAR

2.1 Målsättning

Vid de inledande fältförsök som genomförts inom ramen för projektet har målsättningen varit:

- * att ta fram metodik för provtagning, analys och beskrivning av moränstrukturer
- * att testa metodiken
- * att erhålla preliminära resultat när det gäller en kvantifiering av skilda strukturfaktorerens betydelse för den hydrauliska konduktiviteten.

I anslutning till studierna av sambandet mellan kornorientering och hydraulisk konduktivitet har en hypotes uppställts enligt figur 9. Figuren föreställer ett representativt volymelement av morän där vektorn F står för vattnets flöde genom elementet och vektorn R för medelriktningen hos mineralkornen i moränen. Vår hypotes innebär att ju mindre vinkeln är mellan vektorerna F och R , dvs mellan flödesriktningen och kornens medelriktning, desto högre än den hydrauliska konduktiviteten.



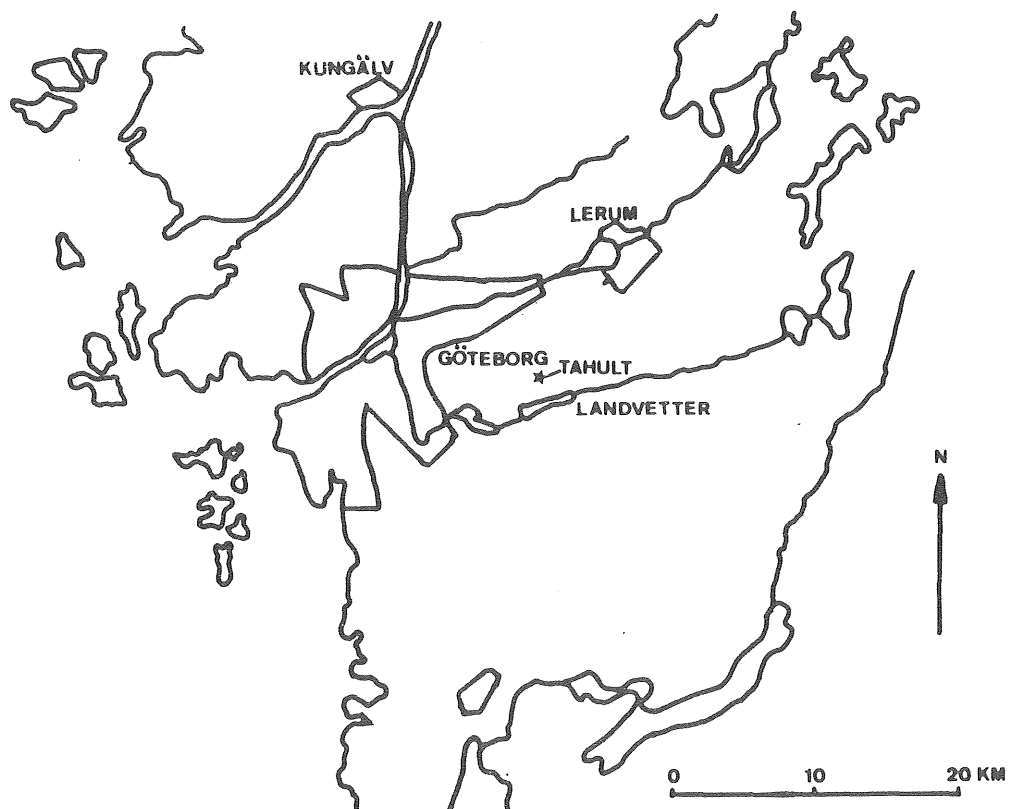
Figur 9 Volymelement av morän med medelriktningen R hos mineralkornen och vattnets flöde F .

Element of till with mean orientation R of the grains and the flow of water F .

2.2 Försöksområde

Valet av försöksområde har styrts av följande kriterier:

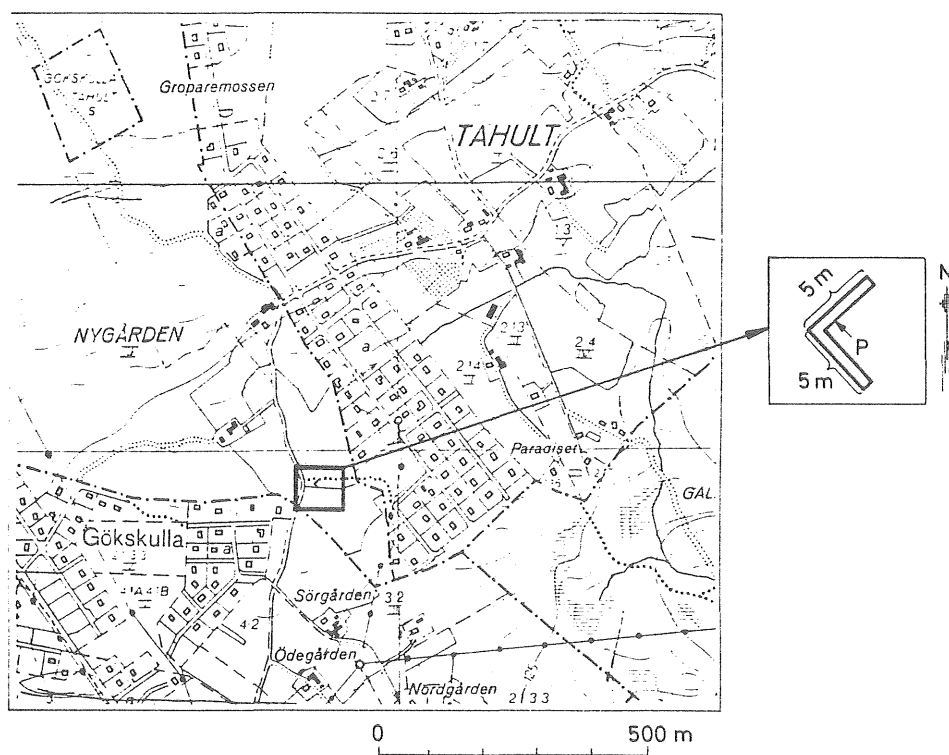
- * jordarten skulle utgöras av morän med en mäktighet av minst 2 m
- * moränen skulle vara sammanhållande, dvs hålla en viss lerhalt
- * moränen skulle ha en identifierbar, asymmetrisk struktur med prefererad partikelorientering i någon riktning
- * av praktiska skäl skulle området ligga i Göteborgstrakten.



Figur 10 Läget av undersökningsområdet i Tahult 10 km öster om Göteborg.

Location of the investigation area at Tahult 10 km east from Gothenburg.

Undersökningar och provtagning har inletts i Tahult, 10 km öster om Göteborg (figur 10). Moränen ligger här avlastad i en drumlinoid form. Med hjälp av traktorgrävare har en moränschakt upptagits. Två vardera 3 m djupa och 5 m långa schaktgravar ansluter i rät vinkel. Gropen är orienterad med en schaktgrav ungefär parallell med drumlinens sträckning och den andra schaktgraven således vinkelrät däremot, figur 11.



Figur 11 Plankarta över moränschaktets läge i Tahult. Profilen i figur 19 är dokumenterad vid läge P.

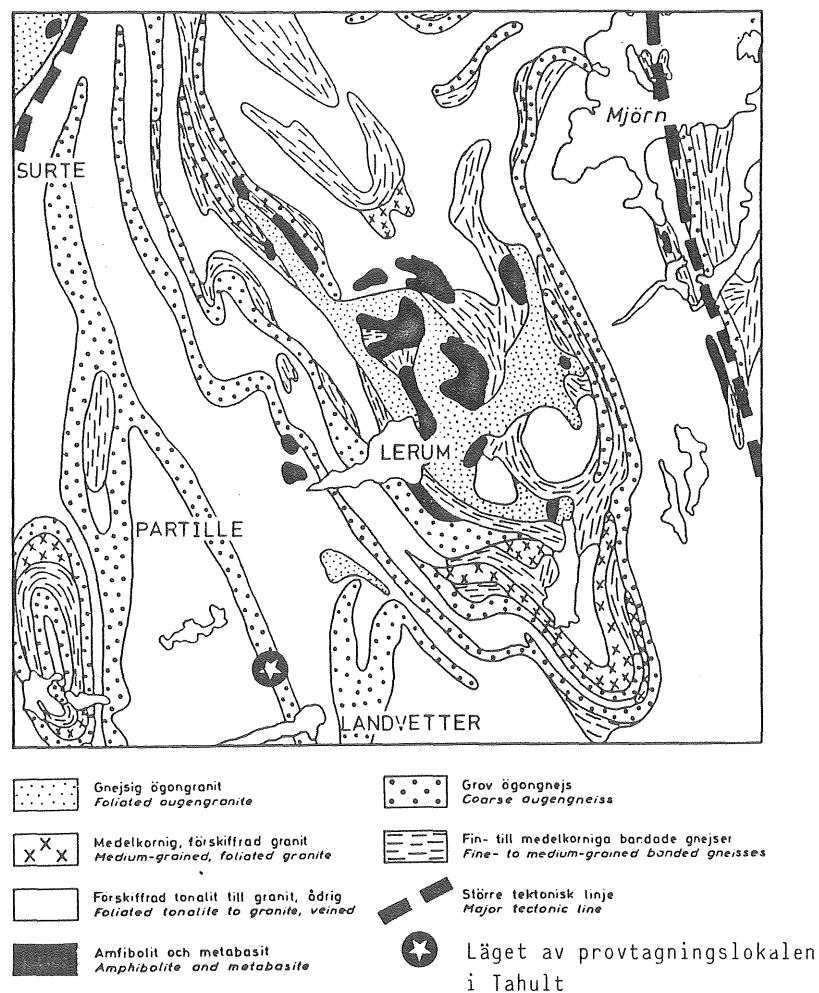
Map over the digged investigation site in till at Tahult. The sediment log in figure 19 is documented at the point P.

2.3 Försöksområdets geologi

2.3.1 Berggrund

Huvuddelen av områdets berggrund består av grå medelkorniga, homogena gnejser med inslag av långsträckta och veckade partier av ögongnejs (Magnusson, 1978).

Bergarterna har genom uppvärmning och pressning genomgått förändringar så att deras ursprungliga utseende och egenskaper delvis förlorats. Dessa processer avslutades för ca 900 milj år sedan. Under den efterföljande perioden har erosion och deposition växelvis dominerat i området. Utsträckningen av berggrunden på kartbladet har en nord-sydlig riktning och tillhör samma geologiska enhet (se figur 12). Moränens mineralogiska och petrografiska innehåll återspeglar berggrunden i trakten. Moränens bergartsfragment har således ofta en gnejsig struktur med mer eller mindre uttalad förskiffring. Moränmassan som helhet har tydliga tecken på vittring - i något större grad än man vanligen finner i urbergsmoräner. Kraftig biotitvittring förekommer, knyt-nävsstora stenar kan i vissa fall vara helt genomvittrade och sönderfallande.



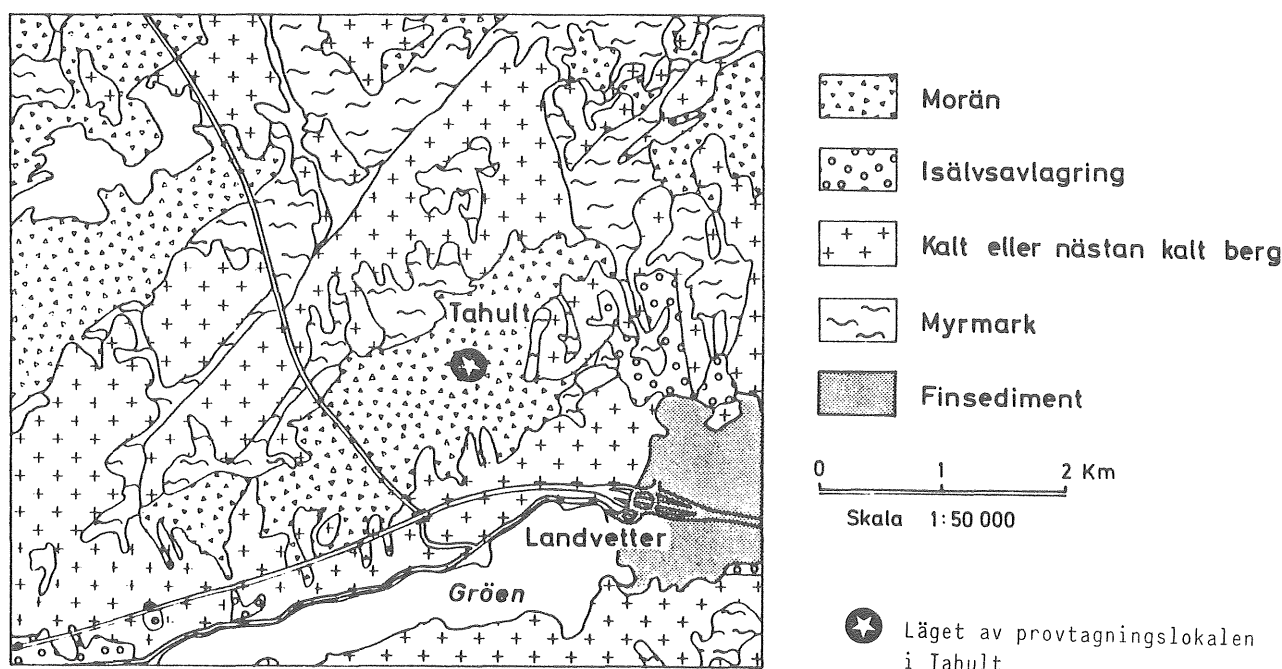
Figur 12

Översiktlig berggrundskarta. Förenklad efter SGU, Ser. Af nr 117. (Ur Magnusson, 1978)
Simplified map of solid rocks. (From Magnusson, 1978)

2.3.2 Kvartära bildningar

Räfflor

Den senaste huvudisrörelsens riktning är från nordost. I förhållande till de stora arealerna av kalt berg inom området är goda räffelobservationer tämligen sparsamma. Vid gården Hallen, ca 200 m sydväst om provtagningslokalen, finns dock plana håll-
 ytor med flera räffelriktningar. Huvudräffelsystemet som är yngst utgörs av tämligen otydlig räffling i N65Ö. Dessa räfflor skärs av äldre räfflor i riktningarna N18⁰Ö och N76Ö (Johansson, 1956).



Figur 13 Översiktlig jordartskarta över Tahult med omnejd. Förenklad efter SGU, Ser. Ae nr 26.

Quaternary map of Tahult and adjacent areas. Simplified from SGU, Ser. Ae nr 26.

Morän

Ett genomgående drag för sydvästra Sverige är den stora andelen kalt berg, se figur 13. Där det inte saknas helt är morän-
 täcket vanligen mycket tunt. De kända större moränackumulatio-

nerna är belägna på nivåer - grovt angivet - mellan 100 och 150 möh. Moränen har normalt en sandig-moig sammansättning. Den mest påtagliga ytformen är flacka, ibland ganska höga och långa ryggar, ofta strömlinjeformat elliptiska och därmed erinrande om drumliner. De är nästan genomgående utsträckta i nordöst-sydvästlig riktning. Den största är Tahultsmoränen, som har en längd av nära 2 km. De högsta partierna når upp till 155 möh och den relativa höjden över omgivande terräng uppgår till omkring 50 m. Tahultsmoränen är belägen över högsta kustlinjen och har således ej utsatts för mera omfattande svallning. Vägskärningar i trakten visar att den sandiga-moiga moränen normalt innehåller en del linser av sorterat material samt har mer eller mindre tydliga presstrukturer.

3 ARBETSMETODIK

3.1 Inledning

Provtagnings- och analysarbetet omfattar i huvudsak följande 5 punkter:

- * provtagning i fält
- * permeameterförsök för bestämning av hydraulisk konduktivitet
- * vattenkemiska analyser
- * bestämning av moränprovernans vattenhållande förmåga för beräkning av porositetsförhållanden
- * kornstorleksanalys
- * plastning av porutrymmet i proverna
- * tillverkning av tunnslip för mikroskopering.

Parallellt med laboratoriearbetet har lermineralogiska bestämningar på finmaterialet gjorts, samt i samband med permeameterförsöken, kemiska analyser på in- och utgående vatten. Vidare har skrym- och kompaktdensitetsbestämningar utförts.

3.2 Provtagning

På ett djup av ca 2 m i schaktväggen i Tahult har prov tagits genom att för hand gräva fram klumpar om 20x15 cm. Samtliga prover har tagits i den understa lerhaltiga moränen, se kap. 4.1. Proverna som kan anses vara helt ostörda är uttagna riktningssorienterade i förhållande till horisontalplan och väderstreck. Proverna har försiktigt skrapats ner till ca 70x80 mm och placerats i behållare, PVC-cylindrar Ø93 mm och höjden 87 mm. Behållarna med jordprov har ställts i stötdämpande kylboxar för transport till laboratorium. Luften i boxarna har fuktmättats ge-

nom vattensprayning av väggar och inläggning av våta trasor. Ingen uttorkning, sprickbildning eller andra skador har kunnat upptäckas på de intransporterade proverna.

I laboratorium vägdes varje prov och fukthaltsbestämdes för beräkning av torrsvikt. Torrsvikten utnyttjas tillsammans med pF-resultaten för beräkning av vattenhalt.

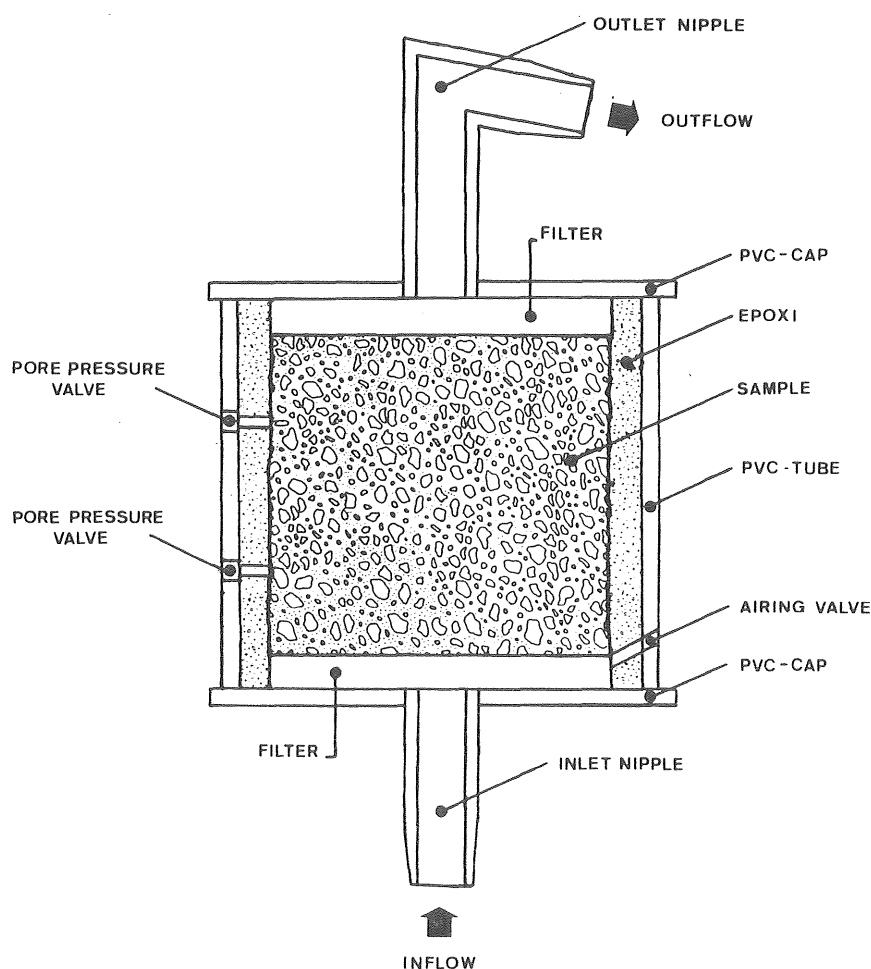
Med 0.2 m intervall med början från 0.75 m djup har prov tagits i schakten för bestämning av kornstorleksfördelningen. Dessa provtagningsnivåer överensstämmer med de för lermineralogisk bestämning.

3.3 Permeameter-test

För jordarter med hydraulisk konduktivitet mellan 10^{-2} - 10^{-8} m/s kan permeametrar av en eller annan typ utnyttjas för konduktivitetsbestämningar. För tätare jordarter med hydraulisk konduktivitet 10^{-9} - 10^{-11} m/s utföres bestämningen i kompressometer (ödometer).

Inom detta projekt har testerna utförts på ostörda prover genom att en permeameter har tillverkats för varje enskilt jordprov. De ostörda jordproverna i PVC-cylindrar har kringgjutits med epoxiplast och försetts med tillrinnings- och avrinningsanordningar (figur 14).

Permeameteren kan sägas utgöra en ingjutningspermeameter typ nippelpermeameter. Denna typ av permeameter har bl a fördelen att in- och utströmningsförluster samt risker med felaktigheter genom igensättning av filtren undviks. Försöken utföres med luftfritt vatten, vilket erhålls genom att vatten har kokats och sedan får svalna till rumstemperatur. Vid försöken har dessutom vattnet värmts till 25°C, dvs några grader högre temperatur än provet på 21°C. När vattnet sedan strömmar genom jorden avkyls det sakta, varvid förmågan att hålla luft i lösning ökar (härvid har hänsyn tagits till att vattnets viskositet förändras, se nedan).

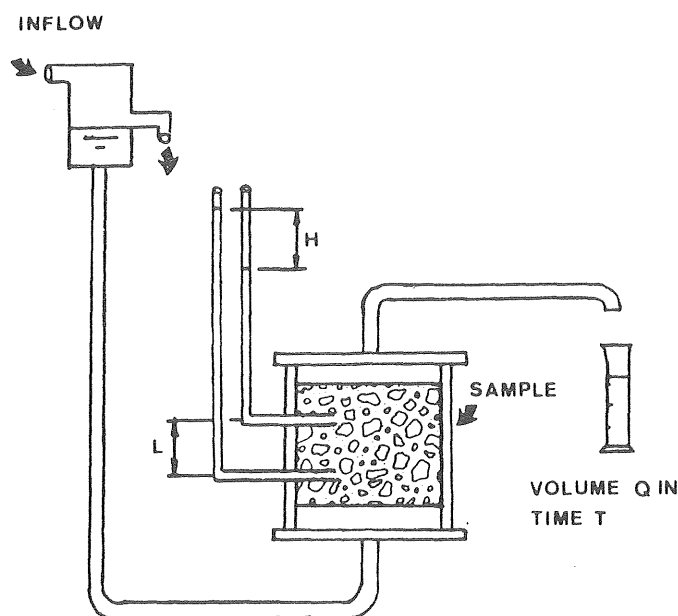


Figur 14 Ingjutningspermeameter.
Permeameter.

Permeameteren består av en PVC-cylinder med fastlimmad botten och lock. Botten är försedd med tilloppsrör, locket med utloppsrör. Nipplarna har en väl tilltagen innerdiameter, 10 mm, vilket ger lågt strömningsmotstånd genom själva permeameteren. Utloppsnippeln är vinklad för att ge så likartade tryckförhållanden som möjligt för alla permeametrar. Permeameteren är försedd med porttrycksgivare av typ instickande nipplar (pitotrör) för mätning av vattentrycket i vissa punkter i provet. I dessa avläses under provningens gång tryckskillnaden, ur vilken den hydrauliska gradienten mellan nipplarna bestäms. Rören för tryckavläsning har en innerdiameter på 3 mm.

Permeameter tillverkas för varje enskilt jordprov. Provet placeras i ett PVC-rör, innerdiameter 85 mm med fastsatt botten. På botten har i förväg en plastklack gjutits. Rörets innerdiameter är ca 20 mm större än provets. Plastlösning blandas med härdare (harts Araldit M, härdare HY 956) och gjuts i utrymmet mellan prov och form upp till 7 mm ovanför provets överyta. Ingjutningen sker med naturfuktigt material där provets yta (1 mm) har torkats med varmluft eftersom plasten fäster bättre på torrt än på fuktigt material. Plasten har god vidhäftningsförmåga så att läckning längs kontaktzonen mellan plast och prov undviks. När plasten härdat borrar hål för nipplar och luftningsrör, ändytorna ursvarvas med låghastighetssvarv. Ett filter av syntetisk vadd läggs mot provet och därefter sker montering av lock och botten.

Permeameterproverna vattenmättas genom att avluftat vatten får stiga underifrån och upp i provet. Vattennivån höjs stegvis, under 8 dagar, till permeameterns övre kant. På detta sätt utnyttjas den kapillära stigningen och instängd luft i porsystemet undviks. Efter vattenmättnad höjs vattentrycket till en tryckhöjd på 0.2 m som bibehålls konstant under hela försöket (se figur 15). Tryckhöjden har valts för att ge rimliga genomströmningstider och samtidigt lämplig gradient mellan porttrycksgivarna. Under pågående försök mäts syrehalten i in- respektive utgående vatten för att registrera eventuellt kvarhållen luft i provet.



Figur 15 Permeameterförsök med konstant trycknivå.

Constant head permeameter.

Den hydrauliska konduktiviteten beräknas, utgående från Darcys lag, enligt formeln (9):

$$K = Q L / A T H \quad (\text{m/s}) \quad (9)$$

Q = under tiden t genomströmmad vattenmängd (m^3)

L = provets höjd mellan nipplarna (m)

A = provets tvärsnittsarea (m^2)

T = tid för genomströmning av vattenmängden Q (s)

H = tryckskillnaden i vattenståndsrören (m)

Den hydrauliska konduktiviteten varierar med temperaturen. Enligt definitionen anges den hydrauliska konduktiviteten vid 60°F som överensstämmer med 15.56°C (Wenzel, 1942). Inom föreliggande projekt gjordes mätning av vattentemperaturen och konduktiviteten beräknades för 15.6°C enligt Wenzel (1942).

Omräkningsfaktorer för korrektion av den hydrauliska konduktiviteten för vattentemperaturen

$t (^{\circ}\text{C})$	f
5	1.35
10	1.16
15	1.01
20	0.89
25	0.80

3.4 Bestämning av moränens vattenhållande egenskaper

För varje enskilt prov i permeameter har en s k pF-kurva upprättats. Den analysutrustning som utnyttjats har upprättats på Geologiska institutionen av Holm och Jonasson och finns utförligt beskriven i Holm (1981). Utrustningen är i stort sett konstruerad efter Anderssons (1972) modell. Jordprovet anbringas med hjälp av kiselmjöl mot en porös platta så att ett obrutet kapillärt system erhålls mellan provet och plattans porsystem. Dessförinnan har permeametrarna avsågats och rengjorts jäms med moränprovets underkant. Ett undertryck, som kan regleras, anbringas i den porösa plattan. Detta undertryck överförs via plattan till

provet och vattenavgång sker tills jämvikt råder. Genom att öka undertrycket kommer allt finare kapillärer att tömmas på vatten. För att förhindra luftgenombrott genom plattan pålägges inte större undertryck än vad plattans porer förmår hålla kvar.

Försök har visat att vid högre tryck än 2 mvp riskeras att proverna störs. pF-mätningarna omfattar därför endast grov- och mellanporer ner till ca 0.015 mm. Grundvattenströmning i finare porsystemet har i praktiken ingen betydelse varför mätningarna får anses ge ett gott mått på de effektiva porernas fördelning.

Avsugning utfördes vid 0.15 m vattenpelare (pF 1.18), 0.35 m (pF 1.54), 0.95 m (pF 1.98), 2.05 m (pF 2.31) Mellan varje ökning av undertrycket vägdes materialet. Ur dessa vikter beräknades sedan vattenhalten för respektive bindningstryck.

Det råder ett samband mellan bindningstryck och pordiameter i ett jordprov. Sambandet mellan bindningstryck och vad man kallar ekvivalent pordiameter lyder:

$$h = 0.3/d$$

där h = bindningstryck (cm vp)

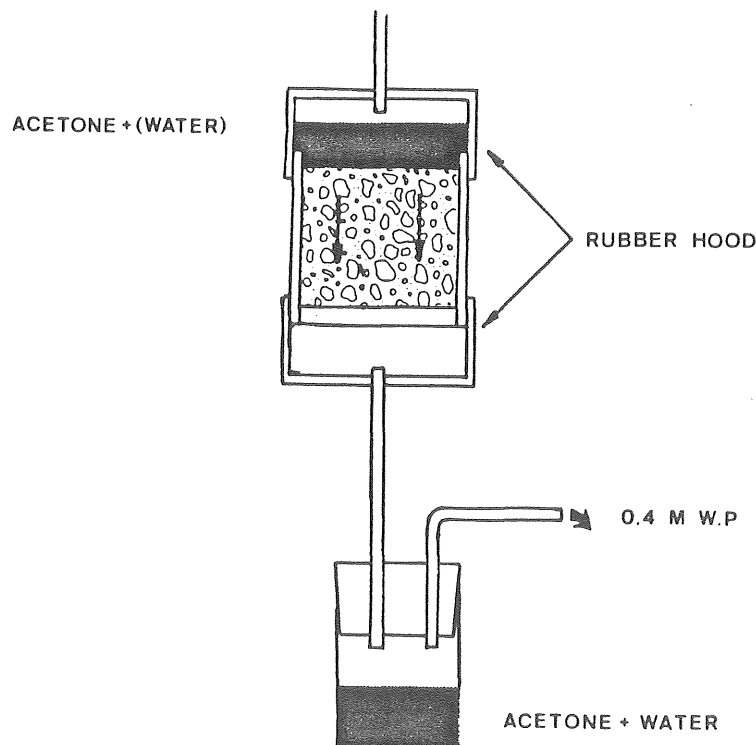
d = ekvivalent pordiameter (cm)

Den totala porvolymen kan efter Odén (1957) indelas i fem olika kategorier:

<u>Porgrupp</u>	<u>Ekvivalent pordiameter</u>	<u>Bindningstryck</u>
	μm	mvp
grovporer	> 200	< 0.15
mellanporer	200-20	0.15-1.5
finporer	20- 2	1.5-15
mikroporer	2-0.2	15-150
ultraporer	< 0.2	> 150

3.5 Inplastning av moränproverna

För att möjliggöra tillverkning av tunnslip göres inplastning av moränprovernans porutrymme. Detta sker genom att en plastlösning får tränga in i porutrymme. Eftersom moränproverna är fuktiga måste innan plastning sker, porvattnet bytas ut mot någon i plasten löslig vätska, se figur 16. Flera författare har beskrivit vattenutbyte med aceton vid plastning av leror (Singh, 1969; FitzPatric, 1984). Problemet vid vattenutbyte i friktionsmaterial är risken för kapillärsprängning. Om en blandning av aceton och vatten tillförs med i början låg koncentration av aceton (10%) minskar risken för sprängning. Efter en successiv höjning till 100% under 2 dygn av acetonhalten kan provet anses vara relativt fritt från vatten. För att studera effekten av utbytet uppskakas lakvätskan med lacknafta för att detektera eventuellt vatten, som då uppträder som en emulsion i lacknaftan.

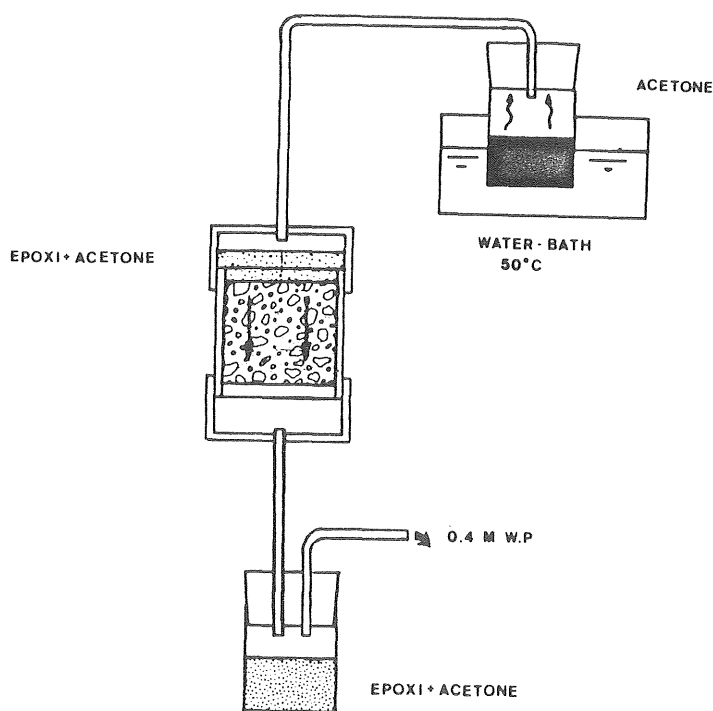


Figur 16 Inplastningen av proverna inleds med att porvattnet byts ut mot ökande koncentrationer aceton i vatten.

Replacement of pore water with increasing concentrations of acetone in water.

Försök har gjorts att frystorka prover före inplastning. Detta har dock gett dåliga resultat varför metoden övergivits.

Inplastningen sker med en av aceton förtunnad epoxiharts av speciell typ för tunnslipstillverkning (Epofix resin). Plastningen sker under ett kombinerat över- och undertryck på ovan- resp undersidan av provet, figur 17. För att möjliggöra studier av eventuella sprickor i proverna har plasten färgats med starkt blå färg. Genom att värma aceton till 40°C i den övre kammaren åstadkommes ett övertryck på ovansidan av provet. Detta övertryck verkar dels pådrivande på plastlösningen, dels förhindrar acetonatmosfären att acetonen i plastlösningen avdunstar. Plastlösningen bör få strömma genom provet under ca 1 dygn för att allt porutrymme skall vara utfyllt. Efter plastning kopplas provet loss och härdningen startar. Det första dygnet får härdningen ske i rumstemperatur. Därefter avslutas härdningen i värmeskåp i 40°C under ytterligare 1 dygn.

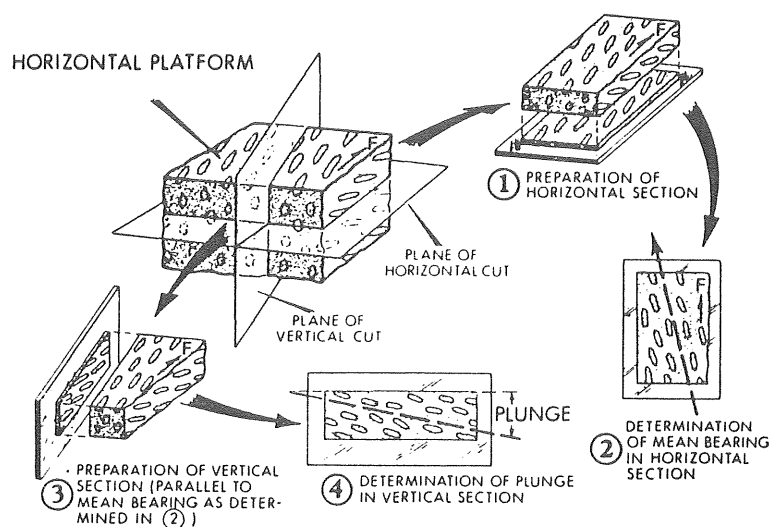


Figur 17 Plastimpregnering med acetontryck och undertryck.

Impregnation of samples containing acetone with Epoxi resin mixture.

3.6 Tunnslip

Tunnslip tillverkades enligt en metod utvecklad för 3-dimensionell mikrofabricanalys av morän (Evenson, 1970), figur 18.



Figur 18 Uttagning av tunnslip (ur Evenson, 1970).

Preparation of thin sections (from Evenson, 1970).

Två mot varandra vinkelräta tunnslip tillverkas. Det ena slipet snittas horisontellt ur vilket kornens strykning beräknas. Det andra slipet läggs parallellt med strykningen och ger kornens stupning. Tunnslipen analyseras i mikroskop med kombinerat genomfallande och påfallande ljus vid en förstoring av 32 resp 63 ggr. I varje plan mäts ca 200 långsträckta korns orientering in i ett 360-graders system. Riktningen räknas som vinkelavvikelsen från flödesriktningen F (se figur 9). Ett korns längsta utsträckning kallas för kornets a-axel, b- och c-axlarna definieras vinkelrätt mot a-axeln. Hos ett långsträckt korn definieras förhållandet $a/b > 3/2$. Storleken av kornen ligger inom 0.5–0.2 mm.

Uppfattningarna om antalet korn som behöver räknas för att fastställa prefererade riktningar varierar kraftigt och är också olika för skilda typer av jordarter. I föreliggande arbete eftersträvas stor detaljnoggrannhet och ca 400 korn har mätts in, för varje permeameterprov, varur kornens medelorientering har beräknats (i de redovisade exemplen har dock färre korn be-

stämmts). För varje permeameter bestäms två medelorienteringar, ett för strykning och ett för stupning. Medelorienteringen kan bestämmas med olika metoder. Den metod som används här bygger på $\cos^2$ -funktionen. Med denna metod blir man oberoende av vilken ände av kornets längdaxel som bestäms, $\cos^2 \theta = \cos^2(\theta + 180^\circ)$.

Medelriktningen för ett antal korn är den riktning där summan är störst av de kvadrerade cosinusvärdena för vinkeln mellan medelorienteringen och varje enskilt korns riktning.

$$F(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \cos^2(\theta - \theta_i), \quad \text{sök } F(\theta) = \max \quad (10)$$

θ = medelriktning

θ_i = varje korns riktning

N = antalet korn

Om alla kornen ligger jämnt fördelade 0-360 grader, dvs en fullständig radiär symmetri råder, saknar medelriktningen all fysikalisk mening. Det är därför viktigt att införa en faktor för styrkan hos medelriktningen. Om vi studerar funktionen igen:

$$F(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \cos^2(\theta - \theta_i) \quad (11)$$

Funktionen har gränserna 1 och 0.5. $F(\theta) = \max = 1$ innebär att orienteringen har maximal styrka. $F(\theta) = \min = 0.5$ innebär att observationerna ligger jämnt fördelade runt cirkeln (Alm, Kleman, 1982).

För att göra analysen av ett större material lättare har ett datorprogram utvecklats med utgångspunkt från ett befintligt program för egenvektoranalys (Alm, Kleman, 1982). Till programmet har utvecklats ett plot-program som grafiskt återger kornorienteringen för varje prov.

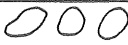
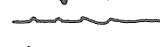
Tunnslipsanalyserna leder till, att för varje prov kan riktningsvektorn R (figur 9) bestämmas med avseende på riktning och styrka.

För övriga strukturfaktorer följer tunnslipsanalyserna blankettuppställningen nedan.

TUNNSLIPSANALYS

Nr.....

Förstoring

<i>Struktur</i>	<i>Typ</i>	<i>Frekvens</i>	<i>Anm.</i>
<i>Kornform</i>	4 Klasser		Enl. fig. 1
<i>Porform</i>	5 Klasser		1  2  3  4  5 
<i>Rundning</i>	5 Klasser		Enl. fig. 1
<i>Ytstruktur</i>	4 Klasser		1  2  3  4 
<i>Aggregat</i>	2 Klasser		1=ja 2=nej
<i>Fabric</i>			
<i>Mineralogi</i>			
<i>Kornfördelning</i>	4 Klasser		1 bandad 2 homogen 3 grupper 4 zonerad

Blankett för analys av moräntunnslip. På blanketten har här klassindelningen för de skilda strukturformerna angetts.

3.7 Spänningsförhållanden i morän

En diskussion har förts inom projektet angående moränens spänningsförhållanden och risken för avlastningssprickor i prover uttagna på 2-3 m djup. Moränen har tolkats som basalt avsatt och en viss överkonsolidering kan förväntas. Detta stöds av bestämningarna av skrymdensiteten där inga förändringar antyds inom 0.5-2 m djup (avsnitt 4.2). I de 18 tunnslip som analyserats har ingen spricka noterats som kan hänföras till deformation efter avlastning. Även om risken för avlastningssprickor tycks vara mycket liten kan det vara av värde att utföra spänningsmätningar. Erfarenheterna av spänningsmätningar i morän är mycket begränsade. Den enda någorlunda utvecklade metoden för mätning av effektiva lateralspänningen i fält är med hjälp av hydraulisk uppspräckning (Bjerrum, Andersen, 1972; Al-Shaikh-Ali et al, 1981). Laboratoriemetod för hydraulisk uppspräckning i ödometer finns också beskriven (Ali-Shaikh-Ali, 1981). Denna metod är dock mindre aktuell inom föreliggande projekt där mätningarna i första hand bör avse förhållandena före provtagning och avlastning. En annan möjlig metod kan vara utplacering av trådtöjningsgivare fastspänd genom instuckna piggar i moränen. Avståndet mellan fästpunkterna bör vara minst 0.5 m och avlastning åstadkommes genom grävning runt den provade moränkroppen. Utveckling av denna typ av provutrustning pågår inom projektet.

4 RESULTAT

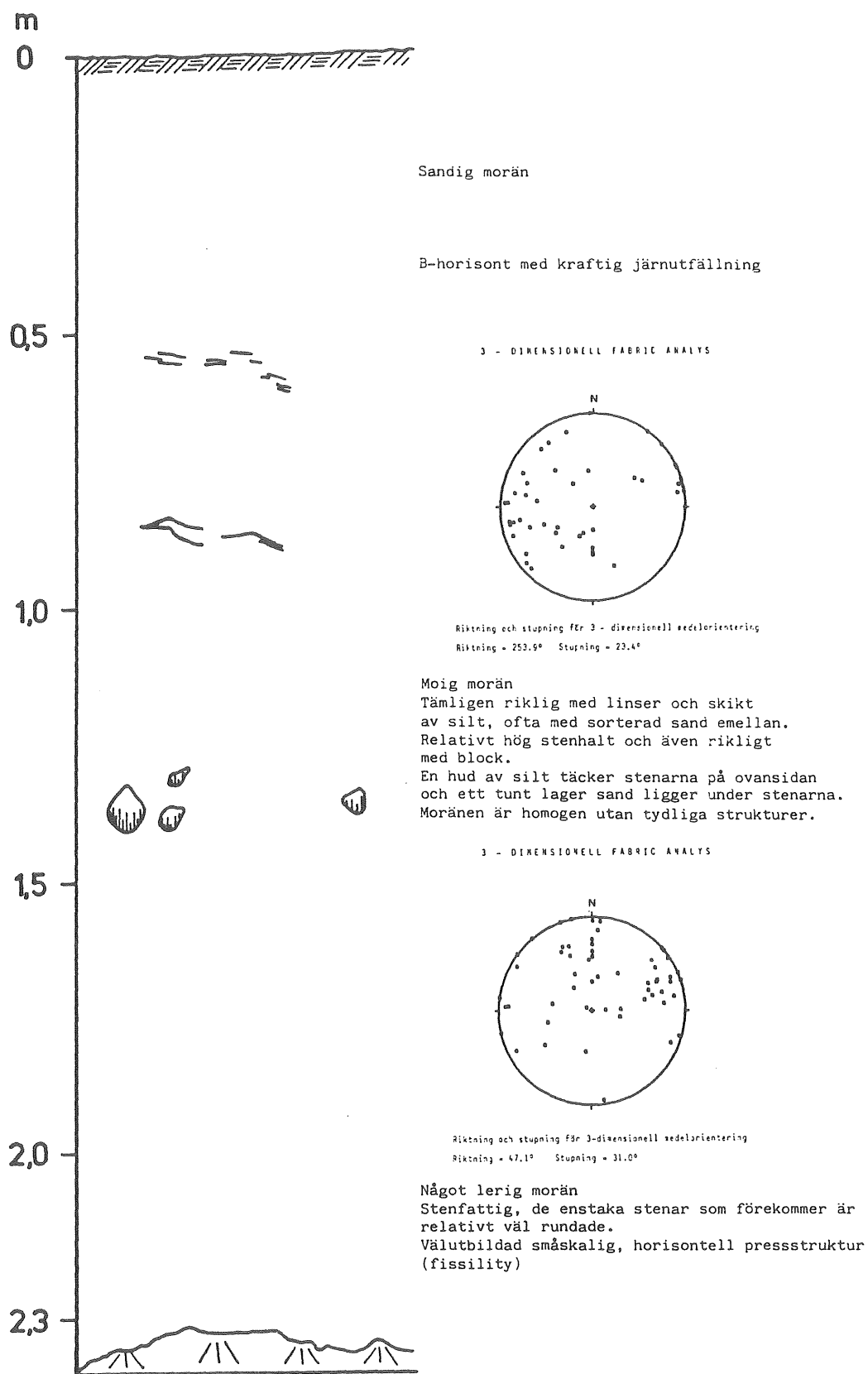
4.1 Textur

Moränen i det upptagna schaktet i Tahult har noggrant studerats innan permeameterprovtagningen inleddes. En dokumenterad jordprofil återfinns i figur 19. Moränen är som helhet moig med inslag av stora sandiga partier och med tämligen låg sten- och blockhalt. Schaktväggarna uppbyggs av tre enheter. Närmast ytan når jordmånsprofilen, med kraftig järnutfällning i B-horisonten, ner till ca 0.90 m djup. Jordarten är sandig morän, grövre än på större djup, och med visst steninnehåll. På ca 0.90 m djup sker en diffus övergång till nästa enhet - en något finkornigare grå morän med tämligen rikligt med linser (1-10 cm tjocka) och skikt av silt. Ofta skiljs flera siltlinser och skikt av 1-3 cm tjocka skikt av sorterad sand. Sten- och blockhalten är här högre än i övriga delar av väggen. I stora drag är moränmassan kaotiskt avsatt utan speciella strukturer. Närgående detaljstudier visar dock vissa horisontella skiffriga strukturer. Enheten är ca 0.50 m mäktig. På ca 1.40 m djup under markytan sker en abrupt övergång till den understa moränenheten. Här uppträder en svagt lerig morän med kraftig horisontell skiffrig detaljstruktur (fissility). Enheten som är sten- och blockfattig fortsätter ner under provschaktens botten. På ett djup av ca 1.5-2 m har organiska inlagringar påträffats. Inlagringarna är någon cm^3 stora och har konstaterats innehålla tämligen rikligt med pollen. I övrigt är den organiska halten mycket låg, ca 0.02%.

Den allmänna trenden med allt finkornigare morän mot djupet framgår delvis av kornfördelningsdiagrammen, figur 20.

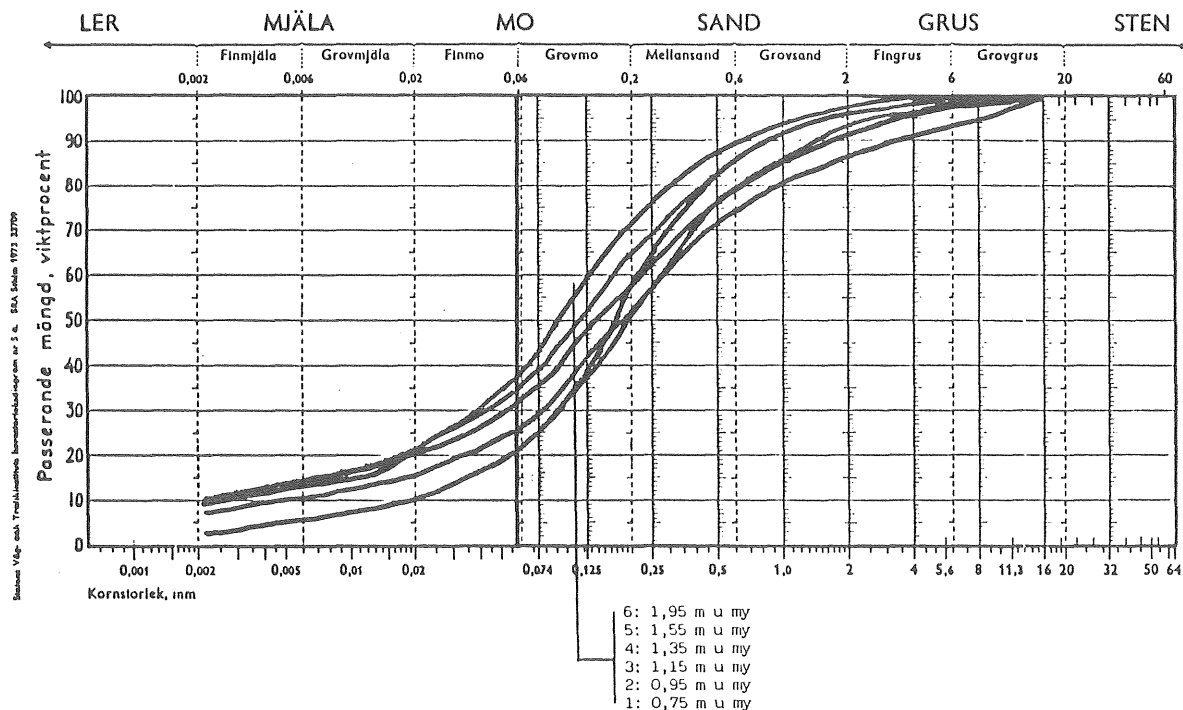
4.2 Kompaktdensitet och skrymdensitet

I C-horisonten fås stabila värden på moränens kompaktdensitet. Kompaktdensiteten ökar något mot djupet från 2.61 g/cm^3 på ett djup av 115 cm till 2.65 g/cm^3 på 190 cm djup. Värdena överensstämmer väl med gängse riktvärde på 2.65 g/cm^3 för ren mineraljord utan större förekomst av ler.



Figur 19 Dokumenterad profil från läge P, se figur 11.

Sediment log from point P, see figure 11.



Figur 20 Kornstorleksanalyser från provtagningslokalen i Tahult.

Grain size distribution in samples from the investigation site at Tahult.

I två parallella profiler har ett antal skrymdensitetsbestämningar utförts. Bestämningarna har utförts genom massbestämning av moränprover under det att proverna varit nedsänkta i lacknafta. Provernas storlek har varit 60-80 cm³ och fukthalten 8 vol%. Densiteten visar ingen systematisk förändring med djupet utan är stabila omkring 2.3 g/cm³.

Skrymdensitetsbestämningar

Djup (m)	Serie 1 (g/cm ³)	Serie 2 (g/cm ³)
0.70	2.04	2.25
0.95	2.35	2.35
1.25	2.36	
1.35		2.18
1.50	2.28	
1.60		2.25
1.80	2.23	
1.90		2.28

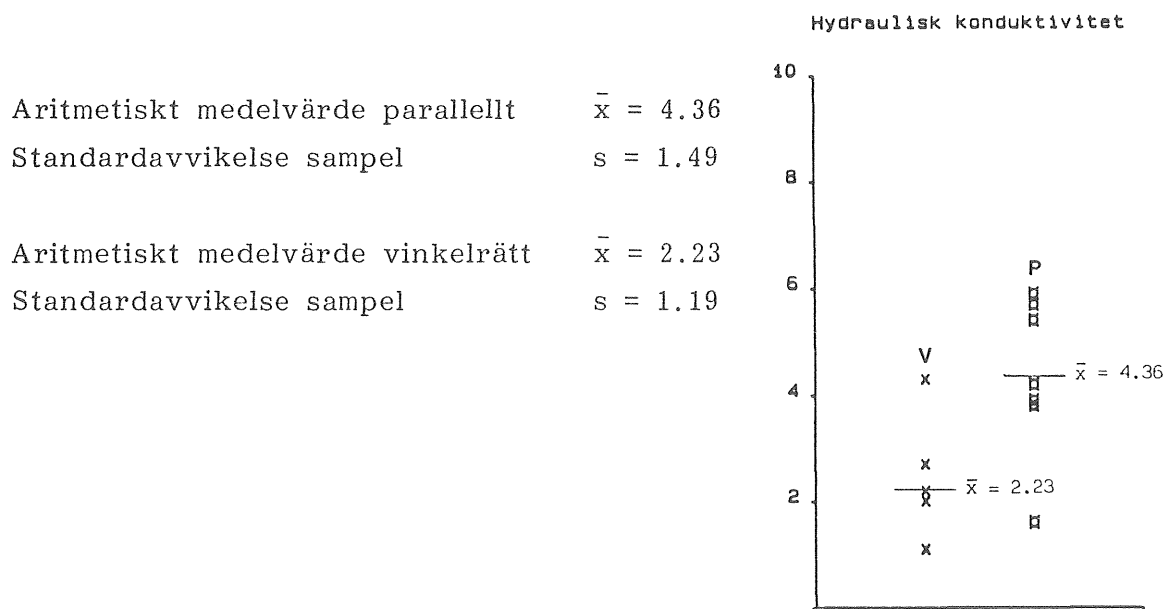
4.3 Hydraulisk konduktivitet

Den hydrauliska konduktiviteten bestämdes genom flödesmätningar med den beskrivna permeameter. Ännu har tämligen få flödesmätningar utförts och osäkerheten beträffande den hydrauliska konduktivitetens variationer är därför stor. Följande redovisning grundar sig på 15 utförda flödesmätningar.

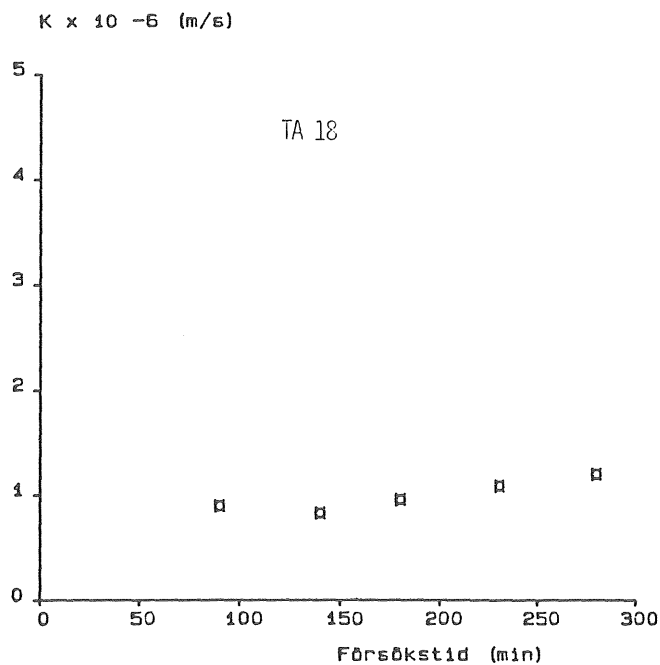
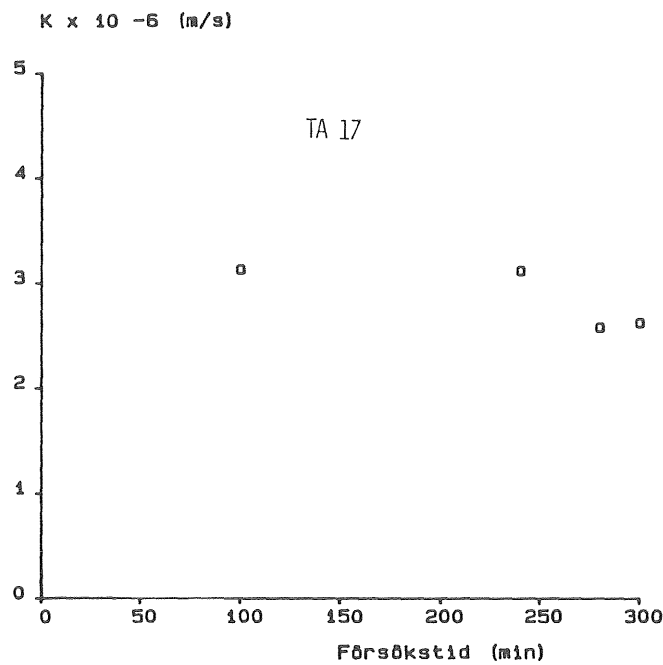
Bestämning av den hydrauliska konduktiviteten i laboratorium medför vissa osäkerheter, dels på grund av provets storlek dels på grund av icke representativt prov. Provstorleken medför att lokala variationer i struktur och textur har stor inverkan. Korn större än 1/5 av provets diameter bör ej finnas i provet, dvs korn större än 14 mm. Efter genomförda försök görs kornstorleksanalys på proverna. I de ca 15 kornstorleksanalyser som hittills genomförts har inget korn ≥ 14 mm påträffats.

Permeameterprov med angiven riktning "P" är flödesmätta parallellt med drumlinens riktning, och riktning "V" avser flödesmätning vinkelrätt däremot.

Permeameter	Hydraulisk konduktivitet $\times 10^{-6}$ (m/s)	Riktning
TA 3	1.1	V
TA 5	5.9	P
TA 6	4.3	V
TA 7	2.2	V
TA 9	5.4	P
TA 11	4.2	P
TA 12	3.8	P
TA 13	5.7	P
TA 14	2.0	V
TA 15	1.6	P
TA 16	2.7	V
TA 17	3.9	P
TA 18	1.1	V



I figur 21 redovisas flödesmätningar från två moränprover, TA 18 som är mätt vinkelrätt mot drumlinens längssträckning och TA 17 som är mätt parallellt.



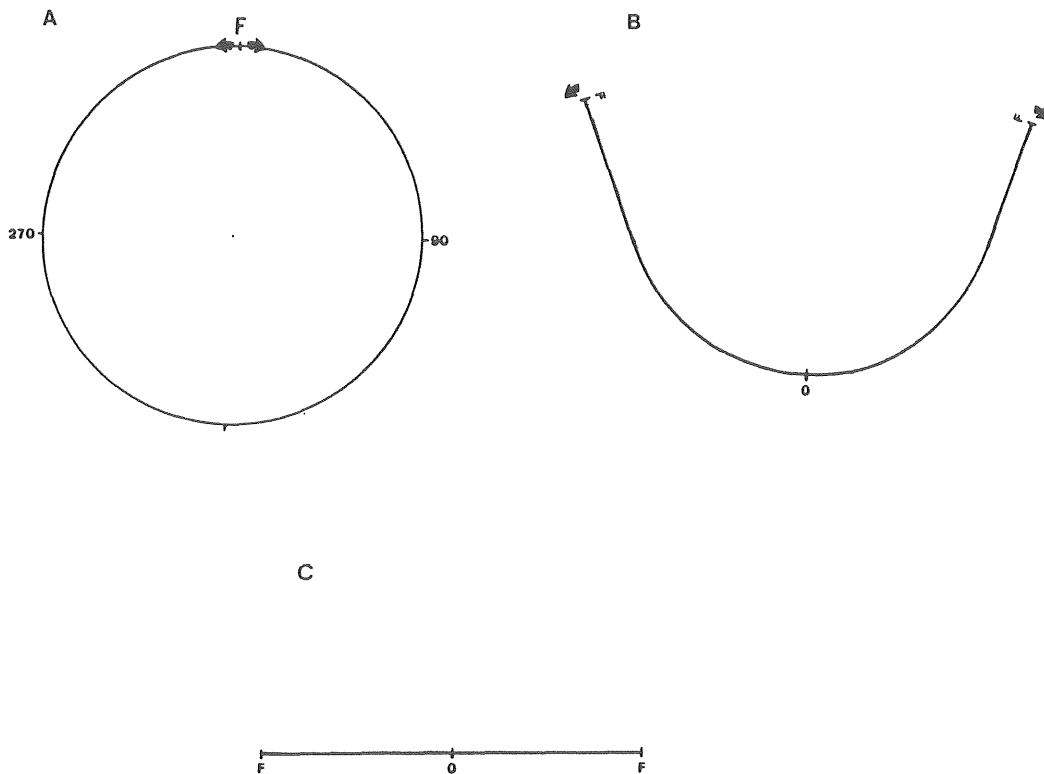
Figur 21 Exempel på flödesmätningar från två prov, TA 18 som är mätt vinkelrätt mot drumlinens längssträckning och TA 17 som är mätt parallellt med sträckningen.

Examples on horizontal hydraulic conductivity perpendicular to the long axis of the drumlin, TA 18, and parallel to the long axis TA 17.

4.4 Resultat av tunnslipsanalys

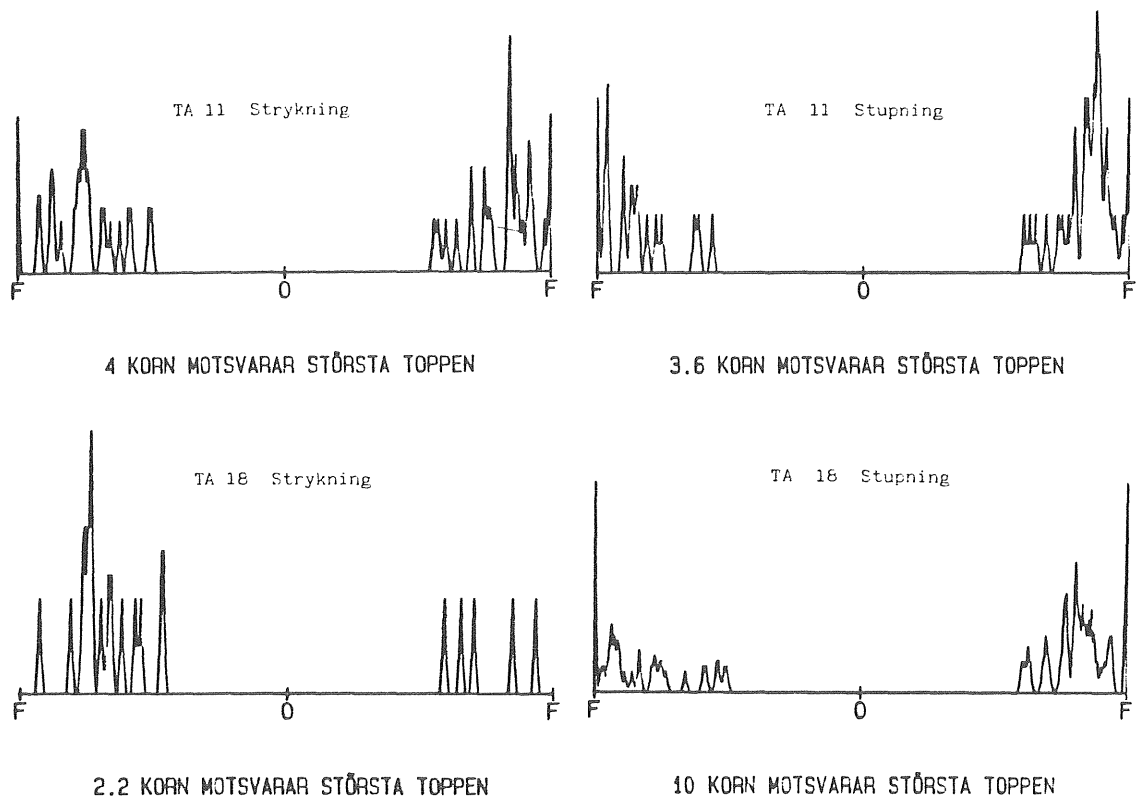
Tunnslipsanalyserna omfattar hittills huvudsakligen partikelorientering. Orienteringsanalyserna redovisas enligt figur 22 genom en rätlinjig projektion av det 360° system som analyserna är utförda i. Exempel på orienteringsanalyser redovisas i figur 23. Här visas stryknings- respektive stupningsanalyser från 2 permeametrar.

Flödesmätning har för permeameter TA 11 skett parallellt med Tahultsdrumlinens riktning (N40E) och för TA 18 ungefär vinkelrätt däremot.



Figur 22 Redovisningsmetodik för partikelorientering.

Presentation of fabric analysis.



P E R M E A M E T E R PROV nr 11

Riktning för strykning

0.7316176°

Styrka

0.586422

Riktning för stupning

165.1797° = 14.8203° mot F

Styrka

0.7655825

P E R M E A M E T E R PROV nr 18

Riktning för strykning

61.49165°

Styrka

0.7147001

Riktning för stupning

34.49833°

Styrka

0.6870818

Figur 23 Exempel på partikelorientering. Diagrammen är behandlade genom en sk filterloop av typen $(a + 2b + 4c + 2d + e)/10$.

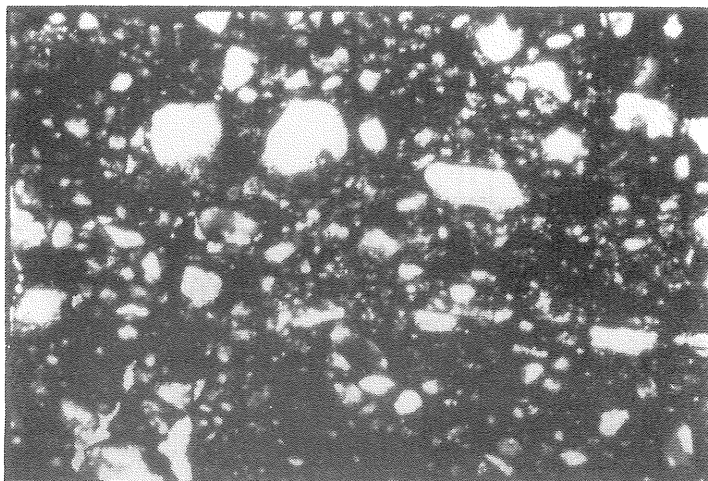
Example of fabric analysis. The diagrams are treated with a so called filterloop.

Tunnslipsanalyserna av partikelorienteringen hos dessa två exempel visar att partiklarna i TA 11 ligger relativt väl orienterade i flödesriktningen. Permeabiliteten för TA 11 bör således vara nära optimal för det aktuella jordprovet. Observera att mycket få korn är inmätta i dessa exempel vilket innebär stor osäkerhet beträffande orienteringen.

TA 18 har en partikelorientering som avviker ca 60° (61.5°) från flödesriktningen.

Permeabiliteten har för TA 11 uppmätts till $4.2 \cdot 10^{-6}$ m/s och för TA 18 till $1.1 \cdot 10^{-6}$ m/s.

Figur 24 visar mikroskopfotografering av tunnslip i ca 10 gångers förstoring.



Figur 24 Foto på tunnslip.

Photo of thin section of till.

4.5 Kemiska analyser

Den undersökta moränen i Tahult har en lerhalt på omkring 6%. Med denna, relativt höga lerhalt kommer lerets uppträdande och fysikaliska egenskaper att ha en påtaglig inverkan på den hydrauliska konduktiviteten. Under opåverkade förhållanden råder ett visst samspel mellan porvattenkemi och lermineralens kemi. Vid permeametermätningarna utnyttjas ett vatten med annan kemisk sammansättning än det naturliga grundvattnet. Av intresse är att studera samspelet mellan porvattnets kemiska sammansättning och katjoner i utbytbar position, samt studera eventuella skillnader i fysikaliska egenskaper hos lermineralen. Den kemiska analysen skall kopplas till den lermineralogiska undersökningen.

Porvattnets sammansättning.

Kalcium	0.2 - 38.4 ppm
Magnesium	0.01 - 7.1 "
Järn	0.00 - 2.8 "
Mangan	0.00 - 3.2 "
Aluminium	0.1 - 15.4 "
Natrium	0.5 - 3.5 "
Kalium	0.6 - 6.3 "
Kisel	2.4 - 6.8 "

Ingående vattnets sammansättning.

pH	6.93
Kalcium	16.4 ppm
Magnesium	1.8 "
Järn	<0.1 "
Mangan	0.05 "
Aluminium	0.05 "
Natrium	8.0 "
Kalium	1.28 "
Kisel	1.12 "
Vätekarbonat	18.3 "
Klorid	9.3 "
Sulfat	37.5 "

Utgående vattnets sammansättning (15 permeametrar)

Kalcium	3.88 - 28.86 ppm
Magnesium	0.119 - 2.04
Järn	13.12 - 79.5
Natrium	10.30 - 23.35
Kalium	2.37 - 5.15

Det analyserade utgående vattent har filtrerats för att avskilja eventuella partiklar.

Det mest anmärkningsvärda är de höga järnhalterna i det utgående vattnet. En tänkbar förklaring är att järnet härrör från den starka biotitvittring som konstaterats i moränen. Vi har noterat att i samband med vattenmättnad av proverna har det luktat svavelväte vilket tyder på reducerande miljö. Laboratoriebestämningar såväl som okulär besiktning visar också på ett visst organiskt innehåll, vilket kan bidra till den reducerande miljön.

Utvärdering av de kemiska analyserna måste ske i relation till moränens mineralogiska sammansättning. Tills vidare kan vi konstatera att moränen uppvisar en reducerande miljö, vilket heller inte är förvånande med tanke på den finkorniga och täta texturen.

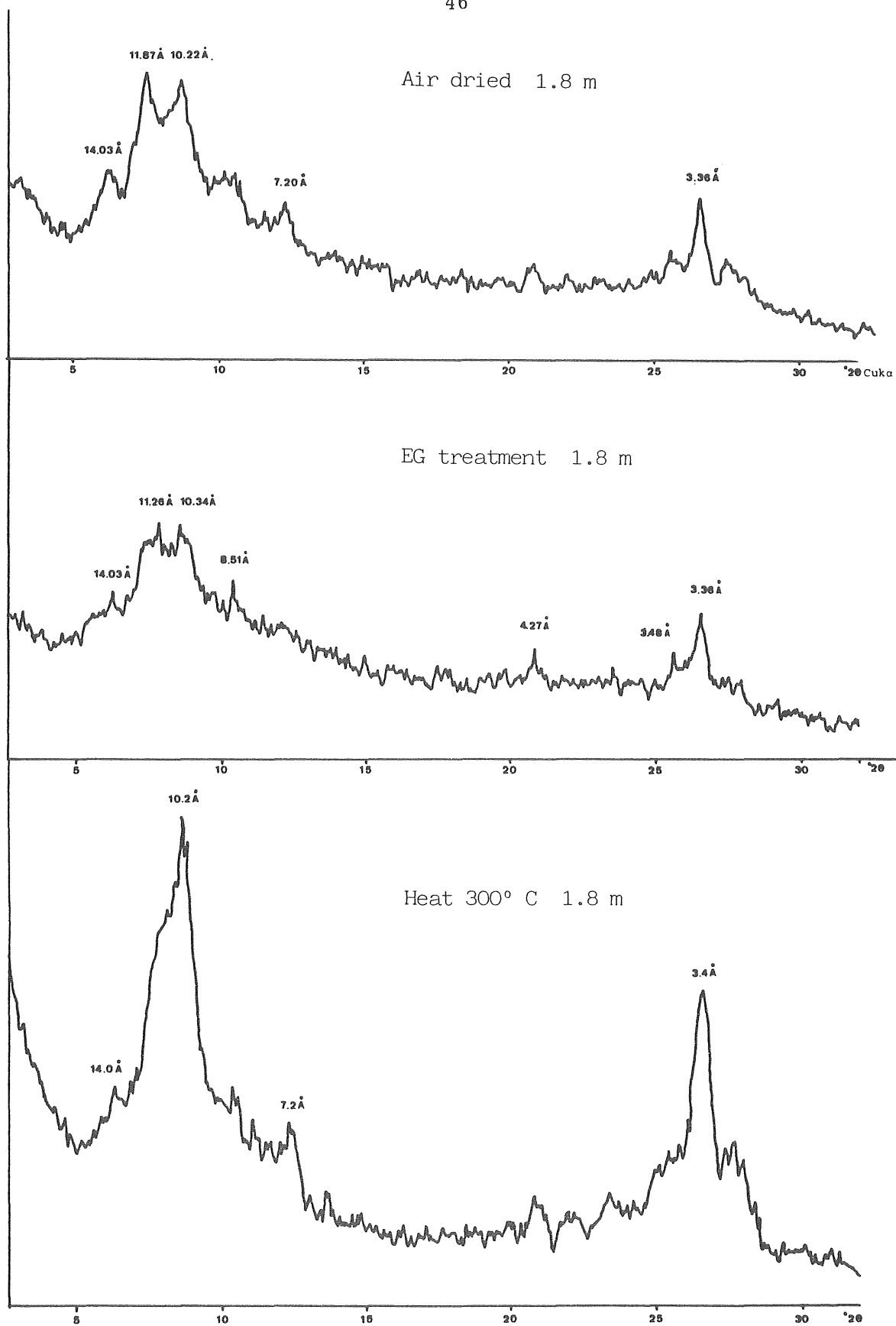
4.6 Lermineralogisk undersökning

Olika leror har skilda fysikaliska egenskaper som i sin tur påverkar den hydrauliska konduktiviteten på olika sätt. Tillsammans med de vattenkemiska studierna skall den lermineralogiska undersökningen ligga till grund för beräkningar av eventuella lerbeförändringar under permeameterförsöken samt betydelsen för hydrauliska konduktiviteten.

En kvalitativ lermineralogisk undersökning har utförts på lerfraktionen ($<2\mu\text{m}$) hos de prover som uttagits för kornstorleksanalys. Röntgendiffraktogram (XRD) togs upp först av lufttorkade preparat, därefter av samma preparat efter förvaring i etylenglykolatmosfär (EG) under minst 1 dygn. Vissa preparat upphettades även till 300°C . Röntgendiffraktogrammen (se figur 25) visade att den undersökta fraktionen var nära lika för de olika proven. Med ett blandskiktmineral och ett $10\text{\AA}$ -mineral samt vermikulit som huvudkomponenter och kvarts, fältspat, amfibol och kaolinit i lägre halter. Makroskopiskt kan i schaktväggen en mycket stark biotitvittring ses. Den lermineralogi som kan ses i diffraktogrammen är i stort ett resultat av denna vittring.

$12\text{\AA}$ -reflexen ($11.87\text{\AA}$) härrör sig från ett blandskiktmineral av biotit/vermikulit (002). Blandskiktmineralet bildar ett led i en vittringskedja med biotit i ena ändan och vermikulit i den andra.

14Å-reflexen förflyttar sig inte vid EG-behandling. Den har därför inte identifierats som en smektitreflex, utan som vermikulit. Några svällande lermineral syns således inte i diffraktogrammen. Kaoliniten härrör troligen från vittrande fältspater.



Figur 25 Röntgendiffraktogram.

X-ray diffraction patterns.

5 REFERENSER

- Alm & Kleman, 1982: Egenvektormetoden som hjälpmedel vid analys av stenorienteringar - geometrisk tolkning. Naturgeografiska inst. Forskningsrapport 37. STOU-NG 37.
- Ali-Shaikh-Ali, H., Davis, G., Lloyd, M., 1981: In situ measurement of K_o in a stiff fissured glacial till by hydraulic fracturing. Ground Engineering. January 1981, pp 19-25.
- Andersson, S., Wiklert, P., 1972: Markfysikaliska undersökningar i odlad jord. XXII. Om de vattenhållande egenskaperna hos svenska jordarter. Grundförbättring, vol. 25.
- Berglund, G., 1979: Problemjordar. Statens lantbruksinformation. Lantbruksuniversitetet, Uppsala.
- Bjerrum, L., Andersen, K.H., 1972: In situ measurement of lateral pressures in clays. Proceedings of the 5th European Conference on soil mechanics and foundation engineering. Madrid, Spain, Vol. 1, pp 11-20.
- Bullock, P., Thomasson, A.I., 1979: Rothamsted studies of soil structure II. Measurement and characterization of macro-porosity by image analysis and comparison with data from water retention measurements. Journal of Soil Science, vol. 30, pp 391-413.
- Butler, B.E., 1955: A system for the description of soil structure and consistence in the field. Journal of Australian Inst. of Agriculture. Science, 21, pp 239-249.
- Chen, Y., Banin, A., Borochovit, A., 1983: Effect of potassium on soil structure in relation to hydraulic conductivity. Geoderma, 30: 135-147.
- Currie, I.A., 1979: Rothamsted studies of soil structure IV. Porosity, gas diffusion and pore complexity in dry soil crumbs. Journal of Soil Science Vol. 30, 3, pp 441-452.

- Dahl, R., Berg, K., Nålsund, R., 1981: Stabilitetsforholdene i skråninger med morene og lignende jordarter. Sluttrapport vedrørende et NTNf-støttet prosjekt. Rep. 17, Geol. Inst. NTH, Trondheim.
- Evenson, E.B., 1970: A method for 3-dimensional microfabric analysis of tills obtained from exposures or cores. *J. Sediment Petrology*, Vol. 40, 2, pp 762-764.
- Fair, G.M., Hatch, L.P., 1933: Fundamental factors governing the streamline flow of water through sand. *Jour. Amer. Water Works Assoc.*, vol 25, pp 1551-1565.
- FitzPatric, E.A., 1984: *Micromorphology of soils*. Chapman and Hall. London, New York.
- Fraser, H.J., 1935: Experimental study of the porosity and permeability of clastic sediments. *Jour. Geology*, vol. 43, 8, 1, pp 910-1010.
- Gustafson, G., 1983: Brunnssystem för värmelagring och värmeutvinning i akviferer. Statens råd för byggnadsforskning. R39:1983. Stockholm.
- Haldorsen, S., Deinboll Jensen, P., Koler, J.Chr., Myhr, E., 1983: Some hydraulic properties of sandy-silty Norwegian Tills. *Acta Geologica Hispanica*, t.18, nr 3/4, pp 191-198.
- Haldorsen, S., 1981: Grain-size distribution of subglacial till and its relation to glacial crushing and abrasion. *Boreas*, Vol. 10, pp 91-105.
- Hendry, I., 1982: Hydraulic conductivity of a glacial till in Alberta. *Ground water*. Vol. 20, 2, pp 162-169.
- Holm, T., 1981: Utrustning för bestämning av jordars vattenhållande egenskaper. Beskrivning, manual och användningsområde. Geologiska institutionen, CTH/GU. Publ. B184. Göteborg.

- Jensen, P., von Brömsen, U., 1985: Infiltration och hydraulisk kapacitet. Avloppsvatteninfiltration. Förutsättningar, funktion, miljökonsekvenser. Nordisk samproduktion, Naturvårdsverket, Nordiska ministerrådet. Stockholm.
- Knutsson, G., 1971: Studies of ground-water flow in till soils. GFF. Vol 93, pp 1-22. Stockholm.
- Kubik, I., Rybicki, A., 1980: Porosity-permeability relation in material with channel pore structure. *Studia Geotechnica et Mechanica*, Vol II, 3, pp 61-71. Poland.
- Lundin, L., 1982: Mark- och grundvatten i moränmark och marktypens betydelse för avrinningen. Uppsala univ. Naturgeografiska inst. UNGI Rapport 56. Uppsala.
- Magnusson, E., 1978: Beskrivning till Jordartskartan Göteborg SO. - SGU Ae 26.
- McGrown, A., Saldivar-Sali, A., Radwan, A.M., 1974: Fissure patterns and slope failures in till at Hurlford, Ayrshire. *Quaternary Journal of Engineering Geology*. Vol. 7, pp 1-26. England.
- Mehuys, G.R., De Kimpe, C.R., 1976: Saturated hydraulic conductivity in pedogenic characterization of podzols with fragipans in Quebec. *Geoderma*, Vol. 15. pp 371-380.
- New York State. Department of transportation, DOT. Soil mechanic bureau. State campus Albany, New York. Report STP 1 (1973). Test prosedier for specific surface analysis.
- Odén, S., 1957: Förslag till klassifikation av markens porer. *Kungl. skogs- och lantbruksakademiens tidskrift*, årg. 96. Stockholm.
- Prudic, D.E., 1982: Hydraulic conductivity of a fine-grained till Cattaraugus county, New York. *Ground Water*. Vol 20, 2.
- Samuelsson, L., 1978: Beskrivning till Berggrundskartan Göteborg SO. - SGU Af 117.

- Singh, R.B., 1969: A versatile method for treatment of clay soils for thin-section fabric studies. *Journal of Soil Science*, Vol 20, 2, pp 269-273.
- Snow, D.T., 1969: Anisotropic permeability of fractured media. *Water Resources Research*, Vol 5, pp 1273-1289.
- Todd, D.K., 1959: *Ground Water Hydrology*. John Wiley, New York.
- Wenzel, L.K., 1942: Methods for determining permeability of waterbearing materials. *Geological Survey Water-Supply paper 887*. Washington.
- Williams, J., Prebble, R.E., Williams, W.T., Hignett, C.T., 1983: The influence of texture, structure and clay mineralogy on the soil moisture characteristic. *Aust. Journal of soil research*. Vol. 21, pp 15-32.

