

Svenska Geotekniska Föreningen
Swedish Geotechnical Society

SGF Notat 2:2005

**Permeabilitetsbestämning
genom laboratorieförsök**

SGF:s Laboratoriekommitté

Linköping 2005

FÖRORD

Utöver de vanligaste geotekniska rutinförsöken finns ett antal olika försök som används vid bestämningar av olika parametrar för speciella ändamål, och vars användning emellanåt föreskrivs i olika anvisningar. Permeabilitetsförsök tillhör denna grupp och har på senare tid också blivit vanliga i miljögeotekniska sammanhang.

Syftet med denna vägledning är att relativt kortfattat informera om permeabilitetsförsök i laboratorium. Vägledningen ska göra det lättare för framförallt geotekniska konsulter och beställare att förstå de olika försöksmetodernas möjligheter och begränsningar och att därmed kunna beställa rätt typ av försök för att få relevanta resultat med tillräcklig noggrannhet i bestämningarna.

Svenska Geotekniska Föreningens laboratoriekommitté arbetar med att informera om laborieverksamhet och utförande av olika geotekniska laborieförsök samt tolkning och användning av resultaten. Det tidigare förslaget till laboratorieanvisningar för permeabilitetsbestämning från kommittén gavs ut för mer än trettio år sedan och denna vägledning är en uppdatering av denna och ett led i det fortlöpande informationsarbetet.

Vägledningen avser inte att vara en handledning för utförande av permeabilitetsförsök. För detta fordras betydligt mer detaljerade beskrivningar, som dessutom varierar något för varje typ av utrustning. Vägledningen avser att ge en allmän orientering om hur permeabiliteten kan bestämmas, vilka utrustningar som vanligen förekommer och vilka krav som gäller för bestämningarna.

Denna skrift har tagits fram av SGF:s laboratoriekommitté med Rolf Larsson, SGI, som huvudförfattare

Kommitténs övriga ledamöter är:

Lars Bjerin	Vägverket
Lars G Eriksson	MRM Konsult AB
Bo Westerberg	Luleå tekniska universitet
Christer Åkerman	SWECO VBB AB

Ett stort antal medlemmar i SGF har också bidragit med värdefulla synpunkter.

INNEHÅLL

Förord	1
Inledning	4
Vägledningens uppläggning	4
Allmänt om permeabilitetsbestämning	5
Krav och felkällor vid permeabilitetsbestämningar	8
Standarder och laboratorieanvisningar	10
Försöksutrustningar och metoder	11
Rörpermeameter	
Nippelpermeameter	
Ingjutningspermeameter	
Kompressometer	
Ödometer	
Försök med stegvis belastningsökning	
Försök med kontinuerlig kompression	
Försök med back-pressure	
Försök med kontrollerad vätskegenomströmning	
Bestämning av permeabilitet i horisontalled	
Triaxialapparat och permeabilitetscell	
Mer att läsa	30

INLEDNING

Permeabilitetsförsök utfördes tidigare främst för att ge underlag för:

- Bedömning av tjälfrågor
- Konstruktion av jorddammar och jordfilter
- Bedömning av grundvattensänkning och infiltration
- Beräkning av injekterbarhet
- Konsolideringsförlopp, även om man här tidigare normalt använde sig av hjälpparametern konsolideringskoefficient c_v som uppskattades ur tids-kompressionskurvor i stegvist belastade ödometerförsök.

Frågeställningen kunde vanligen formuleras ”hur mycket vatten släpper jorden igenom?”.

Idag rör permeabilitetsförsök till stor del tätheten i mycket lågpermeabla täck- och tätskikt samt i olika finkorniga restprodukter och fyllningsmassor. Frågeställningen blir då oftare ”hur lite vatten sipprar trots allt igenom materialet?”. Ofta ställs krav på högsta tillåtna permeabilitet, t.ex. $<10^{-9}$ m/s.

Den huvudsakliga karaktären hos de material som provas har därmed förändrats på senare tid och de aktuella permeabiliteterna är ofta flera tio-potenser lägre än de som förr var mest aktuella. Detta ställer i sin tur ofta betydligt större krav på försöksutrustning och försöksmetodik än de som anges i tidigare laboratorieanvisningar och standarder för mer rutinmässiga försök.

VÄGLEDNINGENS UPPLÄGGNING

Vägledningen är indelad i ett antal underavdelningar:

Den börjar med en allmän beskrivning av principen för permeabilitetsförsök och vad som bestäms, samt för vilka frågeställningar värden på permeabiliteten behövs.

Den fortsätter med en beskrivning av de krav som bör ställas på försöken och de vanligaste felkällorna vid försökens utförande.

De standarder och laboratorieanvisningar för permeabilitetsförsök som används i Sverige idag och kommande europastandard beskrivs och kommenteras kortfattat.

Slutligen beskrivs olika försöksmetoder för permeabilitetsbestämning i en ordningsföljd som i stort följer en minskande permeabilitet hos materialet och en ökande komplexitet i försöksutförandet. Vissa avvikelser har dock fått göras, eftersom faktorerna minskande permeabilitet och ökande komplexitet inte alltid är kopplade till varandra.

ALLMÄNT OM PERMEABILITETSBESTÄMNING

Med permeabilitet avses hur mycket vätska, vanligen vatten, som strömmar igenom ett material per tids- och ytenhet vid en gradient av 1, dvs. strömningshastigheten då skillnaden i tryckhöjd mellan provets över- och underkant är lika med provhöjden. I andra sammanhang använder man oftast beteckningen hydraulisk konduktivitet, men inom geotekniken används traditionellt permeabilitet och det är underförstått att det är vattenströmning genom främst jordmaterial som avses. Permeabiliteten uttrycks i meter per sekund, m/s, och den definieras av Darcys lag, se Figur 1, enligt

$$\frac{q}{A} = v = \frac{k \cdot h}{l} = k \cdot i \quad [1]$$

där

- q = genomströmmande vätskemängd per tidsenhet, m³/s
- A = tvärsnittsarea, m²
- v = skenbar strömningshastighet ($=q/A$) beräknad på total provyta vinkelrätt mot strömningens riktning, m/s
- k = permeabilitet, m/s
- h = skillnad i hydraulisk tryckhöjd på sträckan l , mvp (meter vattenpelare)
- l = längd i strömningens riktning med tryckskillnaden h , m
- i = hydraulisk gradient (förlust i tryckhöjd per längdenhet i strömningens riktning ($= h/l$), sortlöst

Permeabiliteten i ett material beror på den genomströmmande vätskans viskositet, vilken ändras med temperaturen. Den angivna permeabiliteten avser således en viss temperatur, vilken skall vara angiven tillsammans med permeabilitetsvärdet. Normalt avses rumstemperatur eller en medeltemperatur i jorden i den aktuella geografiska lokalen.

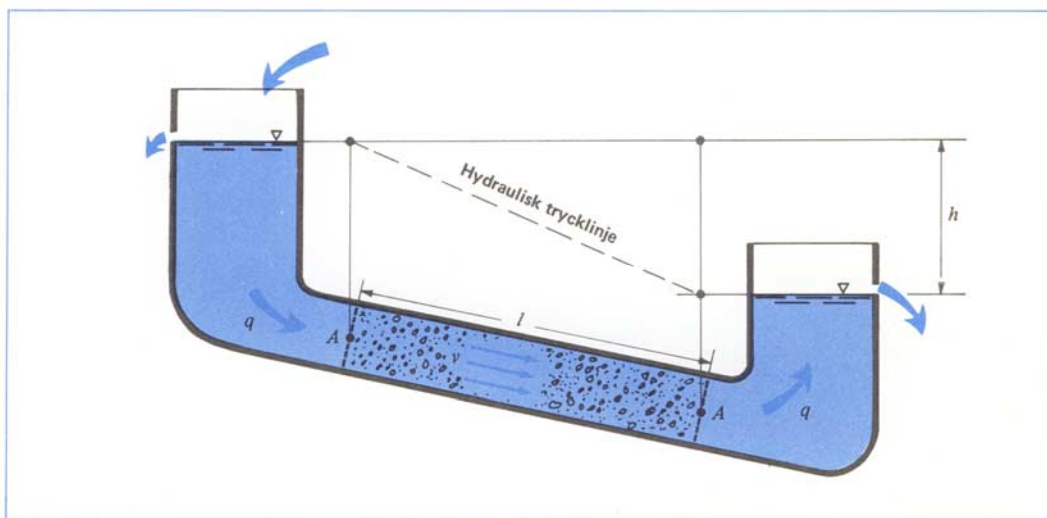


Fig. 1. Schematisk bild av vätskeströmning genom ett poröst material med illustration av parametrarna vätskemängd, q , tvärsnittsarea, A , tryckhöjdsdifferens, h , och längd i strömningens riktning, l .

Permeabiliteten i ett material beror främst på dess porvolym och porstorlek. För material med partiklar av i stort samma storlek, som **enskilda jordfraktioner**, kan permeabiliteten relateras till kornstorleken., Tabell 1.

Tabell 1. Överslagsvärden på permeabilitet för olika jordfraktioner och kornstorlekar.

Jordfraktion	Kornstorlek, mm	Permeabilitet, m/s
Fingrus	2 – 6	$1-10^{-2}$
Grovsand	0,6 – 2	$10^{-1} - 10^{-3}$
Mellansand	0,2 – 0,6	$10^{-2} - 10^{-4}$
Finsand	0,06 – 0,2	$10^{-3} - 10^{-5}$
Grovsilt	0,02 – 0,06	$10^{-4} - 10^{-6}$
Mellansilt-finsilt	0,002 – 0,02	$10^{-6} - 10^{-8}$
Lera	< 0,002	< 10^{-8}

Värdena inom varje jordfraktion varierar främst beroende på partikelform och lagringstäthet.

Naturliga jordar består sällan av en enda jordfraktion och permeabiliteten styrs av den signifikanta fraktion som har den minsta kornstorleken. Naturliga sediment som benämns som ensgraderade jordar med samma beteckning som jordfraktionerna i Tabell 1 har därför en permeabilitet som typiskt är en tiopotens lägre än den som anges i tabellen. För månggraderade jordar styrs permeabiliteten också av den signifikanta fraktion som har den minsta kornstorleken och för de mest månggraderade jordarna, som t.ex. morän, är permeabiliteten flera tiopotenser lägre än vad som motsvarar huvudfraktionens permeabilitet.

Det finns ingen fastlagd klassificering av jord med avseende på permeabilitet. För geotekniska frågeställningar menas med hög permeabilitet oftast att jorden uppträder ”fridränerande”, dvs. att inga påtagliga portrycksförändringar uppstår vid normala belastningar. Detta motsvarar ungefär en permeabilitet större än 10^{-4} m/s. Med lågpermeabel (eller tät) jord avses normalt en permeabilitet lägre än 10^{-7} m/s, vilket motsvarar lera eller finsilt. Motsvarande gränser har använts i denna skrift.

För tätskikt används en något annorlunda indelning. I MIFO (Metodik för inventering av förorenade områden) (Naturvårdsverket 1999) har en uppdelning gjorts i normaltäta material med permeabilitet mellan 10^{-7} och $2 \cdot 10^{-9}$ m/s och täta material med permeabilitet $< 2 \cdot 10^{-9}$ m/s.

Viss utrustning för bestämning av permeabilitet finns på de flesta geotekniska laboratorier medan speciell utrustning för noggrann bestämning av mycket låg permeabilitet främst finns på de laboratorier som dessutom utför miljögeotekniska undersökningar. De flesta av de utrustningar som beskrivs i denna skrift serietillverkas dock och kan således relativt lätt anskaffas. De utrustningar som beskrivs, de jordarter och prover för vilka de huvudsakligen används och de uppgifter som behövs från beställaren framgår i princip av Tabell 2.

Tabell 2. Huvudsakligt användningsområde för olika metoder för permeabilitetsbestämning.

Utrustning	Jord (eller material med motsvarande korn- och porstorlek)	Permeabilitet m/s	Speciellt för försöks-utrustningen	Uppgifter som laboratoriet behöver inför provningen
Rörpermeameter	Grus-sand, hårdpackad jord	$10^{-2} - 10^{-5}$ (gäller främst ensgraderad jord – ned till c:a 10^{-8} m/s i inpackade prover)	Kan användas i samband med packningsförsök	Gradient, portal och/eller packningsförfarande
Nippelpermeameter	Sand-silt	$> 10^{-8}$	Bättre kontroll på gradient	Gradient, portal
Ingjutningspermeameter	Berg, cementserad jord, prover med ojämna sidoytor	$> 10^{-12}$		Gradient
Kompressometer	Finsand-lera, organisk jord	$> 10^{-11}$	Variabel provhöjd	Gradient, portal och/eller inpackning vid störda prover
Ödometer, stegvis belastning	Finsand-lera, organisk jord	$> 10^{-12}$		Konsolideringstryck och gradient (oftast flera bestämningar vid olika konsolideringstryck)
Ödometer, kontinuerlig kompression	Lös silt-lera, organisk jord		Mest rationell för vattenmättad finkornig jord	
Ödometer med back-pressure	Ikke-vattenmättad finkornig jord		Relativt dyr och ovanlig	Krav på vattenmättnadsgrad
Rowe-ödometer (med back-pressure)	Varvig och finskiktad jord		Mätning av horisontell vattenströmning	Provets uppbyggnad, krav på vattenmättnad, konsolideringstryck och gradient
Triaxialapparat och permeabilitetscell (med back-pressure för icke-vattenmättad jord)	Noggrann permeabilitetsbestämning i all typ av jord från sand till lera			Provets uppbyggnad (om inte ostörd homogen jord), krav på vattenmättnad, konsolideringstryck och gradient

KRAV OCH FELKÄLLOR VID PERMEABILITETSBESTÄMNINGAR

Permeabilitetsförsök skall ge svar på frågan om hur stor permeabiliteten är för det aktuella materialet vid den skiktning, lagringstäthet, heterogenitet, sprickighet och temperatur som det har in situ eller kommer att få efter att det installerats på plats.

Laminärt/turbolent flöde

Provningen avser normalt så kallat laminärt vätskeflöde där vattnet strömmar utan virvlar och andra störningar vid måttliga gradienter. Låga gradienter medför ofta långa provningstider och relativt höga gradienter används därför ofta vid provning i lågpermeabla jordar. Dessa får dock inte vara så höga att vätskeströmningen blir turbulent eller att finmaterial spolats ur provet. En kontroll av att strömningen är laminär under försöken kan fås genom att provning utförs vid olika gradienter. Om den utvärderade permeabiliteten då är densamma kan strömningen anses vara laminär. I undantagsfall provas även turbulent strömning i grövre jord. Denna strömning är inte linjär mot gradienten. Gradienten skall därför motsvara den som uppträder in situ för att relevanta värden skall erhållas.

Gradient

Gradienten vid provningen bör specificeras av beställaren. Kostnaden för provningen beror bland annat på provningstiden, vilken blir längre ju lägre gradienten är samtidigt som höga gradienter sällan motsvarar de verkliga förhållanden som provningen avser att simulera och kan innebära felkällor. De högsta gradienter i jordprover som med säkerhet kan förväntas uppfylla de krav som nämnts är i den storlek som anges i Tabell 3. Vid tveksamhet bör kontrollförsök med olika gradienter utföras.

Tabell 3. Rekommenderade högsta gradient i permeabilitetsförsök på jord (värden från Fagerström och Wiesel (1972) och ASTM D-5084).

Permeabilitet, m/s	Rekommenderad högsta gradient
$>10^{-5}$	1
$10^{-5} - 10^{-6}$	2
$10^{-6} - 10^{-7}$	5
$10^{-7} - 10^{-8}$	10
$10^{-8} - 10^{-9}$	20
$< 10^{-9}$	30

Provstorlek

Den minsta provstorleken i försöken bestäms av provets sammansättning. Provstorleken skall vara minst 5 ggr större än största ingående kornstorleken i provet i månggraderade material och minst 10 ggr i ensgraderade material. Detta gäller såväl provhöjd som provdiameter. Dessa krav avser främst steniga och grusiga jordar. Parallellt gäller krav på att provarean skall vara minst 1000 mm² för finkorniga jordprover och 2000 mm² för grovkornig jord.

Lagringstäthet

Permeabiliteten i en jord beror i hög grad på dess porositet. För att få ett rättvisande värde på permeabiliteten skall porositeten vid provningen, vilket också kan uttryckas genom parametrarna torrdensitet eller lagringstäthet, motsvara det som råder eller kommer att råda i fält. För

inpackade prover bör dessa värden och/eller hur provet skall packas specificeras av beställaren.

Vätskemättnad

Den högsta permeabiliteten uppmäts för helt vätskemättad jord. Det är därför viktigt att se till att jorden är helt vätskemättad, vilket ofta är fallet för prover av ostörd naturlig finkornig jord som tagits under grundvattenytan. Andra prover kan prepareras så att de efter införandet i provningsutrustningen är fullt vätskemättade, medan prover där detta inte är fallet får behandlas med utbyte av luft i prover mot koldioxid, genomspolning av vätska och/eller applicering av s.k. mottryck (back-pressure), allt efter lämplighet och behov.

Vätskans beskaffenhet

Permeabiliteten kan vara beroende av den genomströmmande vätskans kemiska sammansättning. Vid provning av permeabilitet för vatten bör man därför använda ett vatten med i stort samma sammansättning som grundvattnet på den aktuella platsen. Är detta okänt används normalt vanligt kranvatten. Det är ofta direkt olämpligt att använda destillerat vatten eftersom detta lakar ut eventuella salter i det provade materialet, vilket i sin tur kan få ämnen att fällas ut och jordens struktur att förändras och därmed påverka permeabiliteten. Försöken utförs helst med avluftad vätska för att minimera risken för gasutveckling och öka möjligheten för eventuella gasblåsor i provet att lösas upp i vätskan.

Temperatur

Permeabiliteten beror på den genomströmmande vätskans temperatur, vilken i sin tur bestämmer dess viskositet. Det värde på permeabiliteten som bestämts vid en viss temperatur kan räknas om till motsvarande värden vid andra temperaturer med ledning av viskositetens temperaturberoende, se Figur 2. De flesta försök utförs därför vid rumstemperatur. Det är dock viktigt att temperaturen är konstant under försökens utförande och att det anges vilken temperatur som permeabilitetsvärdet avser.

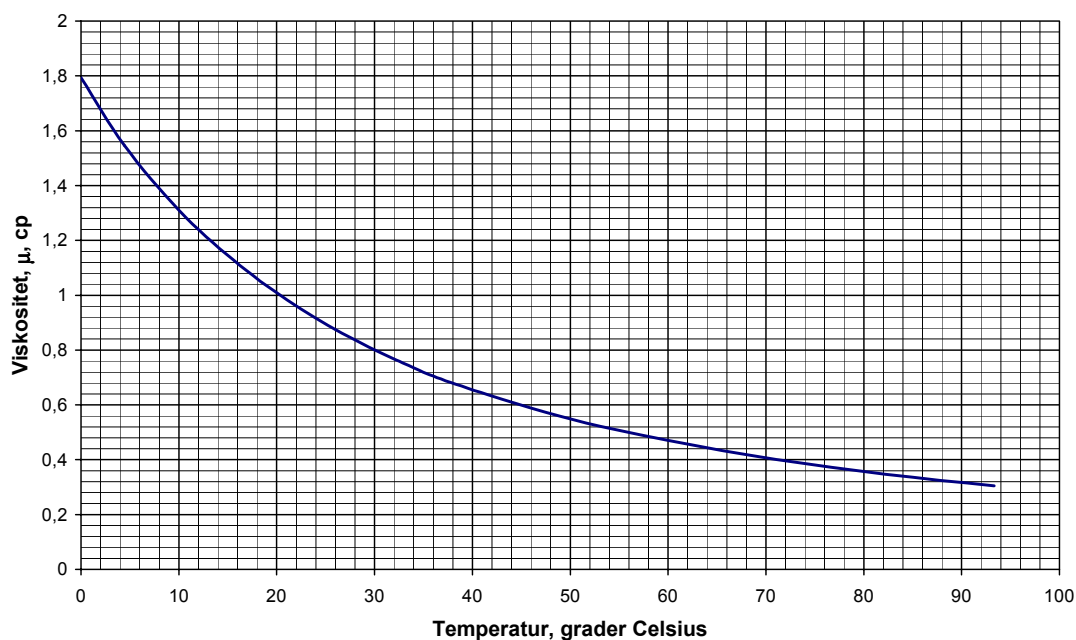


Fig.2. Omräkningsfaktorer för permeabilitet vid olika temperatur.

(Permeabiliteten k vid temperaturen T beräknas ur $k_T = \frac{k_{\text{försökstemperatur}}}{\mu_T} \mu_{\text{försökstemperatur}}$ och

viskositeten μ för försökstemperaturen respektive temperaturen T avläses i diagrammet)

Struktur

Permeabiliteten i en jordmassa påverkas starkt av jordens makrostruktur och strömning i skikt och sprickor. Det är därför viktigt att provet är uppbyggt på ett sådant sätt att det motsvarar jorden in situ och att provningen simulerar vattenströmning i den relevanta riktningen. Vidare skall provdimensionen vara så stor att inverkan av spricksystem blir av samma storlek som in situ.

Övriga felkällor

Felkällor under utförandet av försöket efter att ovanstående beaktats är främst:

- Läckage utefter provsidorna som medför att vätska strömmar förbi provet istället för igenom detta.
- Strömningsmotstånd i filter och ledningar som påverkar de uppmätta värdena.
- Volymförändringar i provet på grund av spänningsförändringar eller andra strukturella förändringar med åtföljande svällning eller konsolidering.
- Förändringar i den vätskemättade porvolymen på grund av att gas pressas ut, går i lösning eller frigörs.
- Temperaturvariationer under försöket som medför att provets volym förändras och att relationerna mellan fasta fasens volym och porvolymen ändras eller alternativt att en extra gradient skapas i provet medan dessa förändringar pågår.
- Avdunstning av vätska i mätörer och diffusion genom slangar och membran vid långa mätningar av låga permeabiliteter.
- Läckage i utrustningarna.
- ”Piping”, dvs. urspolning av finare material och kanalbildning i jorden (oftast på grund av för hög gradient).
- Bakteriell tillväxt i jorden vid långvariga försök.

Inverkan av dessa faktorer varierar med försöksutrustning, provningsmetodik och typ av provat material.

STANDARDS OCH LABORATORIEANVISNINGAR

Befintliga standarder och laboratorieanvisningar för permeabilitetsbestämning är begränsade med avseende på provningsmetoder och behandlar till stor del äldre typer av utrustning. Förslaget till laboratorieanvisning från SGF:s laboratoriekommitté skrevs 1972 och svensk standard för permeabilitetsbestämning SS 02 71 11 är baserad på detta. Standarden behandlar dessutom endast de enklaste av de metoder som beskrivs i laboratorieanvisningarna, dvs. försök i rörpermeameter, nippelpermeameter och ingjutningspermeameter.

En genomgång av befintliga metoder för permeabilitetsbestämning i fält och laboratorium gjordes inom Nordtest (1994) med rekommendationer för metoder att användas för restprodukter och finkornig jord.

En senare och mer detaljerad anvisning beträffande försök på dels lågpermeabel dels ursprungligen icke vattenmättad jord presenterades av ISSMGES tekniska kommitté ETC5 (1998). Denna ligger till grund för den EU-standard som kommer inom kort.

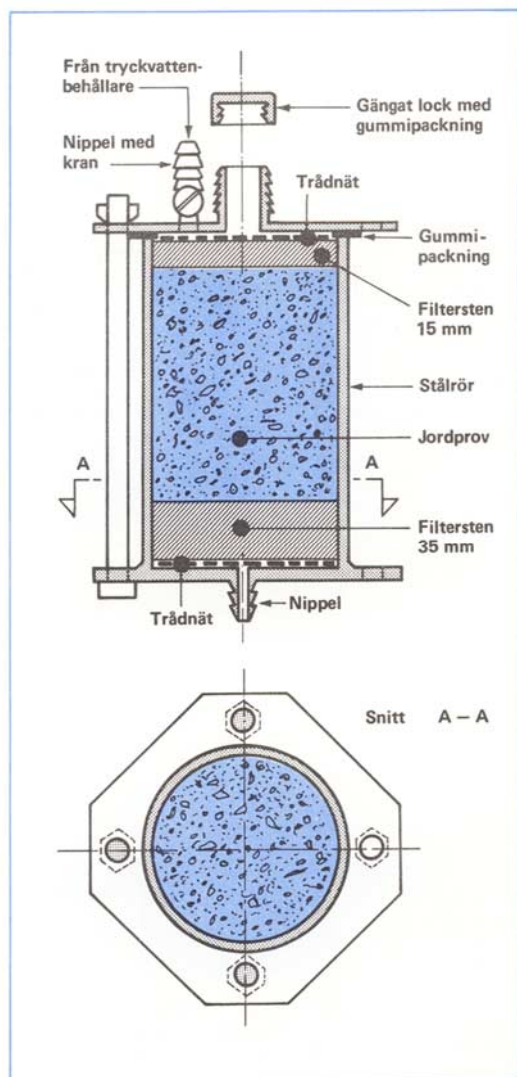
FÖRSÖKSUTRUSTNINGAR OCH METODER

Rörpermeameter

Används huvudsakligen för prover med relativt hög permeabilitet, 10^{-2} – 10^{-5} m/s samt prover med permeabilitet ned till c:a 10^{-8} m/s som packats med laboriöstampning eller laborievibrering.

En rörpermeameter, Figur 3, består som namnet anger av ett rör. Jordprovet packas in i röret, provets ändtytor förses med något slags filter som skall vara mycket permeablare än provet och rörets ändar tätas med gummipackningar och nippelförsedda plattor som bultas fast. Provhöjden skall vara avpassad så att inget glapp uppstår mellan prov, filter och ändplattor. Eventuellt kan det övre filtret fjäderbelastas för att tillse detta. Därefter vattenmätts provet så gott det går innan provningen utförs. Rörpermeameteren är mest lämpad för material med

permeabiliteter som är i storleken 10^{-2} till 10^{-5} m/s. Stabila mätvärden kan då erhållas inom några timmar. Principen för en rörpermeameter används också för prover som packats in med standardiserad laboriöstampningsmetod eller laborievibrering. I dessa fall används inpackningscylindrarna som permeametererrör.



Rörets höjd och diameter avpassas efter kornstorleken hos den provade jorden. Höjd och diameter är oftast ungefär lika och kan uppgå till mellan 0,3 och 1m för grusig respektive stenig jord. För andra jordar används ofta vanliga packningscylindrar med diameter och höjd cirka 100 mm. Cylinderns insidor kan bestrykas med asfaltklister eller konsistensfett för att minska risken för hålrum och läckage utefter provets sidor vid permeabilitetsprovningen. Röret placeras på den undre ändplattan och det undre filtret, som skall vara vattenmättat läggs i. Inpackningen av provet sker som regel vid en vattenkvot som motsvarar den optimala vattenkvoten vid lätt stampning. Enstaka korn som är större än maximalt tillåten kornstorlek i förhållande till rördiametern plockas bort. Inpackningen görs tills ett utrymme i röret som motsvarar höjden av det övre filtret återstår.

Fig. 3. Exempel på en rörpermeameter, se också Figur 4.

Därefter läggs filtret i, packningen läggs på plats och den övre ändplattan bultas fast.

En packning vid optimal vattenkvot resulterar inte i fullständig vattenmättnad, utan man försöker först åstadkomma en ytterligare ökning av vattenmättnadsgraden genom att låta vatten sakta strömma upp från botten genom provet. Därefter ansluts nippeln på den ena ändplattan till en vattenreservoar och den andra nippeln via en mätslang till ett mätrör. Provningsen sker normalt med en konstant tryckhöjd (och gradient) som skall vara så låg att ingen urspolning av material sker. Den väljs ofta i samma storlek som provhöjden. Den utströmmade vattenmängden mäts regelbundet tills ett stabilt flöde erhålls i flera efterföljande mätningar. Permeabiliteten beräknas enligt ekvation [1].

Rörpermeameter ger endast ett grovt värde på permeabiliteten som kan vara påverkat av olika felkällor. Dels kan läckage utefter provets sidor inte uteslutas, dels kan resultaten påverkas av strömningsmotstånd i filter och slangar, dels är provet ofta inte helt vattenmättat.

För att eliminera den första felkällan kan provet tryckas ut ur inpackningsröret och föras in i ett större rör med efterföljande fyllning av mellanrummet mellan prov och rörväggar med lättsmält vax, en blandning av bentonit och sand, silikon eller annat väl tätande material som fyller alla hålrum men inte tränger in i provet. I övrigt kan samma provningsarrangemang användas men provningen utförs då mer enligt principen för en ingjutningspermeameter.

För att eliminera felkällor från strömningsmotstånd i slangar och filter kan röret förses med insticksnipplor där trycknivån kan mätas inuti provet på visst avstånd från filtren vid provets topp och botten. Detta motsvarar en nippelpermeameter.

För att eliminera felkällor från såväl sidoläckage som ofullständig vattenmättnad kan provet tryckas ur packningscylindern och placeras inuti ett gummimembran i en cell där det utsätts för såväl ett allsidigt omgivande tryck som får gummimembranet att täta mot provets utsida som ett mottryck i porvattnet som förbättrar vattenmättnadsgraden. Man har då övergått till provning i triaxialapparat eller permeabilitetscell.

Nippelpermeameter

Används främst för prover med permeabilitet ned till cirka 10^{-8} m/s.

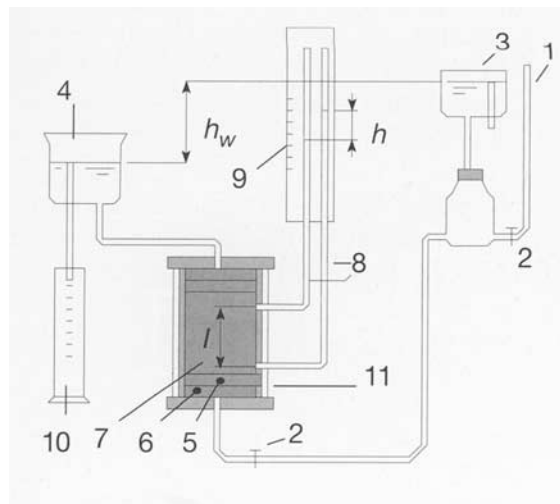
Nippelpermeametrar har fördelen jämfört med rörpermeametrar att in- och utströmningsförluster samt fel på grund av igensättning av filter elimineras. Samtidigt medför nipplarna som sticker in i provet att konstruktionen blir mer komplicerad och att en exakt packning enligt ett normerat förfarande försvåras. Nippelpermeametrarna har ofta andra dimensioner än packningscylindrarna, eftersom någon normerad packning enligt Proctor eller liknande ändå inte kan åstadkommas. För att få god tätning utefter rörväggarna, kläds dessa ofta med en mjuk gummiduk, vilket dock också reducerar packningsmöjligheterna.

Nipplarna placeras normalt på ett avstånd av minst 15 mm från provets ändtytor. Nipplarna sticker in horisontellt i provet och är försedda med filter för att släppa igenom vatten, men inte sättas igen. De ansluts till nivårör med 3 – 4 mm innerdiameter för avläsning av tryckhöjderna.

Provet prepareras och packas in som i rörpermeameter, men packningen måste utföras med stor försiktighet så att inte nipplarna och den eventuella gummiduken skadas, samtidigt som nipplarna skall ges en god kontakt med den omgivande jorden .

Efter montering av övre filter och lock vattenmätts provet i görligaste mån. I de fall proven packats in i torrt tillstånd kan vattenmätningen underlättas genom att man först ersätter luften i provet med koldioxid som försiktigt blåses genom provet. Koldioxid spolats lättare ur provet vid den efterföljande vattenmätningen, vilken görs genom att vatten får stiga upp underifrån genom provet, och eventuellt kvarvarande blåsor av koldioxidgas löses lättare i vattnet än vad luft gör.

Provningen sker som för rörpermeameter genom att provets underkant ansluts till en vätskereservoar med konstant vattennivå och dess överkant till ett mätrör där den genomströmmade vattenvolymen kan avläsas. I nippelpermeameter avläses tryckskillnaden som skillnaden i vattennivå i de stigrör som är kopplade till nipplarna och gradienten räknas över avståndet mellan nipplarna. Principen framgår av Figur 4. Mätningen pågår tills ett antal efterföljande avläsningar visat att konstant flöde och gradient uppnåtts.



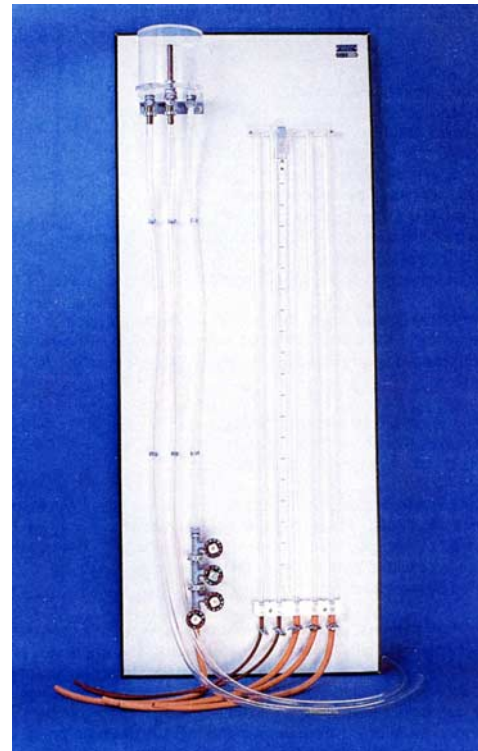
1. Påfyllning av avluftat vatten
2. Kran
3. Tillflödesreservoar
4. Utflödesreservoar
5. Filter
6. Trådnät
7. Prov
8. Vattenståndsrör
9. Avläsningsskala
10. Mätrör

- h_w Inställd tryckskillnad mellan tillflödes- och utflödesreservoarer
 h Skillnad i tryckhöjd över mätlängden
 l Mätlängd

Fig. 4. Mätprincip i en nippelpermeameter.

För tätare jordprover kan ett något enklare arrangemang användas. Provets underkant ansluts då till en stor vattenbehållare i vilken vattenytan kan sjunka sakta under försökets gång. I detta fall ändras också avläsningarna i stigrören och gradienten med tiden. Man får då beräkna permeabiliteten ur skillnaden i genomströmmad vattenmängd och medelgradienten mellan varje avläsningstillfälle och fortsätta avläsningarna tills ett stabilt värde på den beräknade permeabiliteten erhålls. Försök i nippelpermeameter utförs på prover med permeabiliteter ned till cirka 10^{-8} m/s.

Ett flertal olika modeller av rörpermeametrar och nippelpermeametrar finns på marknaden (dvs serieproduceras av tillverkare av laboratorieutrustningar), se Figur 5. Ytterligare modeller av egen konstruktion finns på ett flertal laboratorier.



a)

b)

Fig. 5. Exempel på utrustning för försök i rör- och nippelpermeametrar
a. Rör- och nippelpermeameter
b. Utrustning för att hålla konstant tryckhöjd och avläsning av tryckhöjder

Ingjutningspermeameter

Används för prover av berg och cementerad jord samt prover med ojämn utsida.

Ingjutningspermeametrar används då provets utsida är alltför ojämn för att läckaget utefter provets sidor skall kunna försummas samt för prover av berg och cementerad finkornig jord, där mycket höga gradienter måste användas för att mätvärden skall erhållas inom rimlig tid.

För naturligt lagrad jord används ingjutningspermeametrar då naturliga sammanhållande prover som tagits som större blockprover eller prover som tagits ut ur sina provtuber skall provas. Dessa får annars inte tillräckligt god anliggning mot permeametrarnas väggar för att förhindra läckage längs dessa. Även inpackade prover där man befarar stora håligheter i provens utsidor kan komma ifråga. De senare provtyperna har redan cirkulära tvärsnitt och blockprover trimmas till denna form. Provet förs in i röret till en rörpermeameter med en större innerdiameter än provet. Spalten mellan provet och rörväggen skall vara så stor att ett tätningsmedel, som helt fyller spalten och alla hålrum i provets ytterkanter men samtidigt inte går in i provet, kan föras ned. För detta ändamål kan användas t.ex. smält vax med en mycket låg smältpunkt, en tjock suspension med en blandning av bentonit och sand eller silikon. Gemensamt för de använda medlen är att de har en flytande konsistens då de förs ned, men sedan övergår till en elastisk massa som inte kan spolas bort. Val av medel beror på spaltens

storlek och porstorleken i jordprovet. Vattenmätning och provning utförs som för vanliga försök i rörpermeameter.

Prover av berg eller cementerad finkornig jord, vanligen kärnborrhövar, gjuts in i ett heltäckande tjockt lager av plast, Figur 6. Provet placeras tillsammans med ovan- och underliggande anslutningsnippel i en cylinderformad gjutform och det kvarvarande utrymmet i denna fylls med gjutplasten. När denna stelnat avlägsnas gjutformen och anslutningsnippelarna ansluts till tryckledning respektive mätrör för genomströmmat vatten. Försök av denna typ utförs på prover med permeabiliteter ned till 10^{-11} á 10^{-12} m/s. För att få igenom erforderliga vattenmängder erfordras ofta mycket höga gradienter och anslutningar och plasthöljen måste då dimensioneras med hänsyn till detta. Gradienterna får dock inte vara så höga att strukturen i berget eller cementeringen i jorden bryts ned. I mer avancerade försök kan två hål borrar på lämpligt avstånd i plasthöljet för anslutning till portrycksmätare, så att en typ av nippelpermeameterförsök kan utföras.

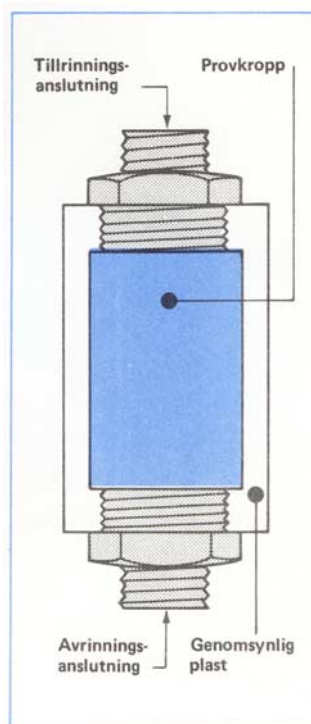


Fig. 6. Ingjutningspermeameter för prover av berg och cementerad jord.

Kompressometer

Används främst för störda prover av finkornig jord.

Permeabilitetsförsök i kompressometer avser i Sverige normalt försök där provet innesluts i ett gummimembran med utanpåliggande styva ringar som håller provdiametern konstant (i stort samma utrustning som för direkta skjuvförsök). Utomlands, t.ex. enligt ETC5 och kommande EU-standard, avser ”compression permeameter” en utrustning med en fast ödometerring. Kompressometerförsök enligt svensk modell används idag normalt endast för störda prover av finkornig jord, t.ex. siltiga jordar. Fördelen jämfört med försök i ödometern är då att provhöjden kan varieras efter provets karaktär.

Före provets montering kläms ett gummimembran fast runt den piedestal som innehåller den undre filterstenen så att det blir tätt. Utanpå gummimembranet träs ett antal tunna metallringar med ett inbördes avstånd i höjddled så att provet senare skall kunna komprimeras i vertikalled. För detta används normalt en speciell delbar monteringscylinder. Provet packas sedan in till

önskad provhöjd och lagringstäthet (med reservationen att möjligheten att få en mycket fast inpackning är begränsad). Därefter påförs den övre tryckstämpeln med filtersten och dräneringskanal och gummimembranets överkant kläms fast tätt runt denna. Därefter förs en viss last på med hjälp av det tillhörande belastningsstativet och monteringscylindern avlägsnas. Provet vattenmätas sedan på samma sätt som i en nippelpermeameter med långsam vattenströmning upp genom provet, eventuellt föregången av ett utbyte av luft i provet mot koldioxid. Dräneringsledningarna ansluts till nivåflaskor med avstängningskranar samt vattenståndsrör, Figur 7.

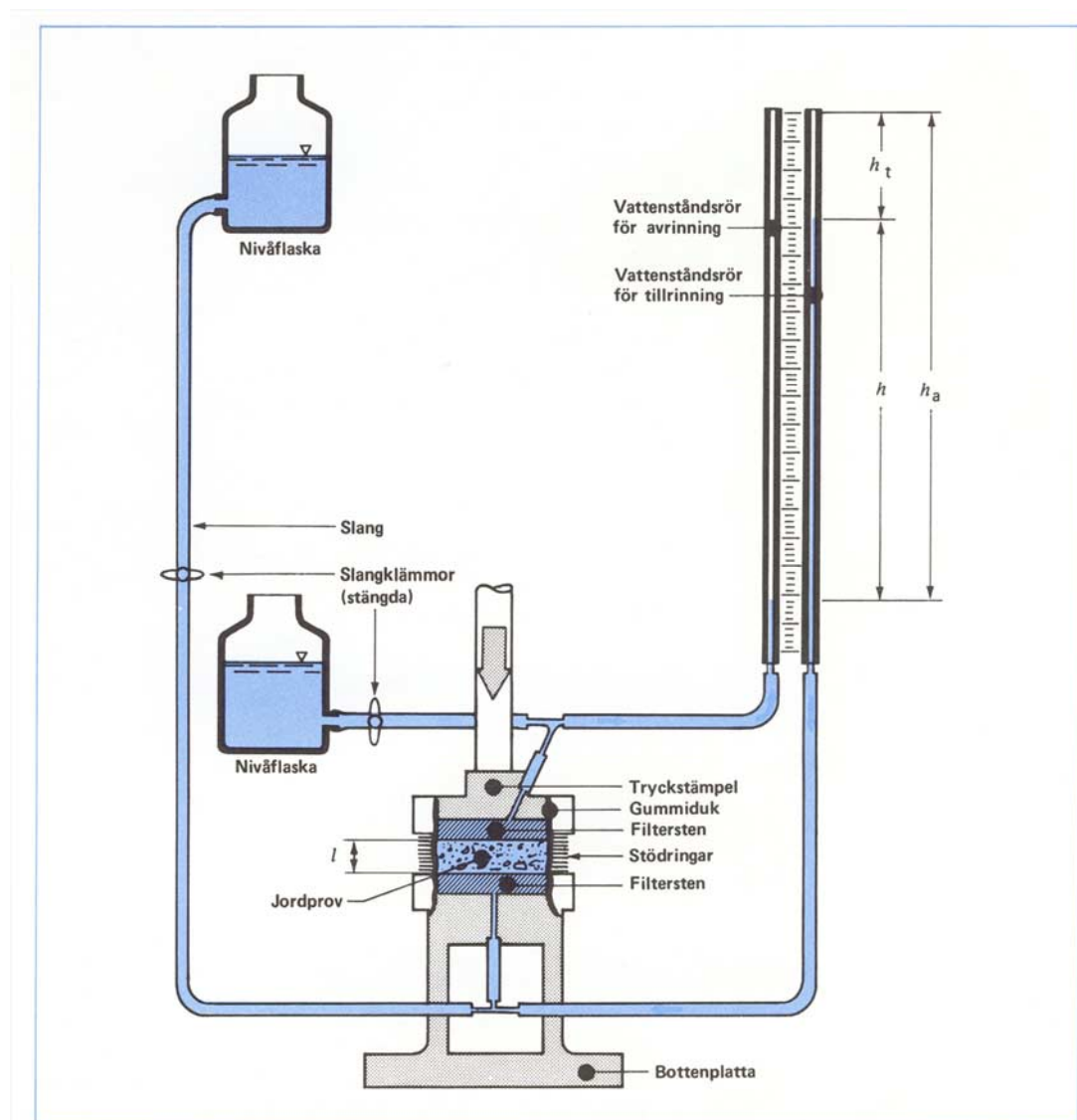


Fig. 7. Princip för permeabilitetsförsök i kompressometer.

Provet får först konsolidera för en förutbestämd vertikallast. Lasten skall avpassas med hänsyn till att den motverkas av vattentrycket i provet och att den med god marginal skall överskrida det maximala vattentryck som senare kommer att appliceras i provets underkant vid permeabilitetsprovningen. Vid permeabilitetsprovningen skapas en gradient över provet genom att den nivåflaska som är kopplad till den undre filterstenen höjs upp. Samtidigt stiger också nivån i det tillhörande vattenståndsröret. Kranarna till nivåflaskorna stängs och vatten strömmar från vattenståndsröret till provets underkant, genom provet till dess överkant och vidare in i det vattenståndsrör som är anslutet till denna. Gradienten avtar därmed allteftersom

vattnet strömmar igenom systemet. Detta kallas försök med variabel tryckhöjd ("falling head test").

Permeabiliteten i försök med variabel tryckhöjd och dubbla vattenståndsror utvärderas enligt

$$k = \frac{l \cdot A_r}{2 \cdot t \cdot A_p} \cdot \ln \frac{h_1}{h_2} \quad [2]$$

där

- k = permeabilitet, m/s
- l = provets höjd, m
- A_r = vattenståndsrorens area, m²
- A_p = provets area, m²
- t = $(t_2 - t_1)$ genomströmningstid, s
- h_1 = tryckhöjd vid tiden t_1 , m
- h_2 = tryckhöjd vid tiden t_2 , m
- ln = naturliga logaritmen

Tryckhöjden $h = h_a - h_t$

där

- h_a = avläsning i avrinningsroret
- h_t = avläsning i tillrinningsroret

se Figur 7.

Vattenståndsroren avläses med jämna tidsmellanrum och permeabiliteten beräknas efter varje avläsningstillfälle. Försöket fortsätts tills man får ett konstant värde på den beräknade permeabiliteten.

Permeabilitetsförsök i kompressometer kan användas för jord med mycket låg permeabilitet, ned till cirka 10^{-11} m/s. Felkällorna är främst läckage, konsolidering och diffusion. Dessa kan upptäckas genom en kontroll av att vattenmängden i trycksystemet är konstant, dvs. att $(h_a + h_t)$ är konstant. En minskande vattenmängd tyder på läckage eller diffusion medan en ökande mängd tyder på att provet konsoliderar, dvs. provhöjden minskar och vatten pressas ut ur provet. Läckage måste avhjälpas genom tätning eller ommontering av provet. Efterkonsolidering genom krypsättningar i provet kan avhjälpas genom att provhöjden låses efter att den egentliga konsolideringen för lasten uppnåtts. Diffusion genom slangar och gummimembran är dock svår att avhjälpas. Denna är dock så liten att den endast har betydelse då provet har en mycket låg permeabilitet ($k < 10^{-11}$ m/s)

Ödometer

Används främst för vattenmättade finkorniga prover.

Försök med stegvis belastningsökning

OBS! Med permeabilitet ur stegvisa ödometerförsök avses ibland värden som uppskattats indirekt från moduler utvärderade ur det uppmätta last-sättnings sambandet och konsolideringskoefficienter utvärderade ur tids-sättnings samband uppmätta i enskilda laststeg. Denna typ av uppskattning är så grov och osäker att den inte kan liknas vid en permeabilitetsbestämning.

Vid permeabilitetsförsök i ödometer med stegvis belastning skall filterstenen under provet vara försänkt i bottenplattan och täcka provets anliggningsyta. Bottenplattan skall vara försedd med en o-ring som tätar mot ödometerringen då denna dras fast samt kanaler och

anslutningsnippel så att den undre filterstenen kan anslutas till en nivåflaska och ett vattenståndsrör. Det finns något annorlunda utformningar, som också medför att porvatten kan pressas ut eller in över hela provets bottenyta men sedan endast har förbindelse ut genom anslutningsnippeln, Figur 8. Dessa är dock något mer svårhanterliga vid försök på ostörda prover som tagits med t.ex. kolvprovtagare och som trycks direkt in i ödometerringen.

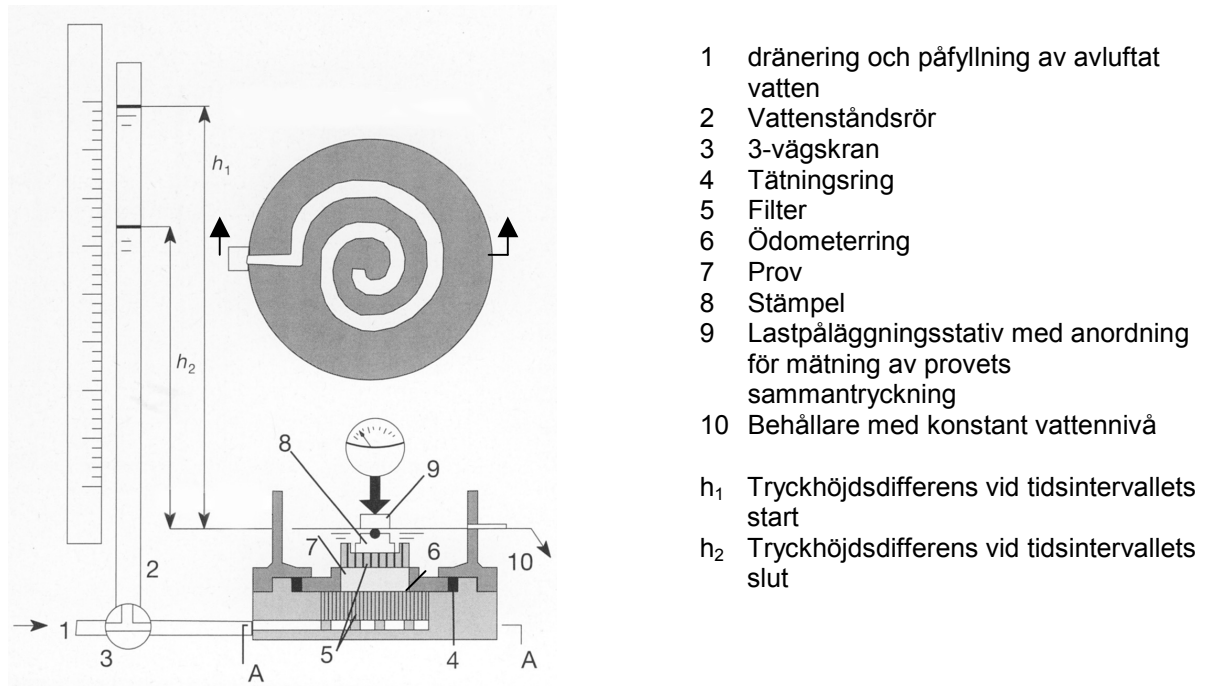


Fig. 8. Principskiss för permeabilitetsförsök i ödometer.

Försök i ödometer kan utföras på inpackade prover som packats in på motsvarande sätt som i kompressometern. En något bättre packning kan som regel åstadkommas i den styva ödometerringen, vars insida smörjs med ett tunt lager av fett innan inpackningen. Fettet avser främst att minska sidofriktionen vid konsolideringen av provet, medan tätningen åstadkoms genom god passning och att jorden också pressas ut mot väggarna då den belastas vertikalt. Vattenmätning efter inpackning åstadkoms som i kompressometern.

Ostörda prover av finkornig jord pressas direkt från provhylsan in i den smorda ödometerringen på samma sätt som vid vanliga ödometerförsök. Prover av finkornig jord som tagits under grundvattenytan är som regel vattenmättade och det behöver då endast tillses att ingen luft finns i filtersten och kanaler eller byggs in vid monteringen på bottenplattan.

Proverna konsolideras för en förutbestämd vertikallast, varefter provhöjden låses och en gradient skapas över provet genom att nivåflaskan höjs. Efter att nivån i vattenståndsröret stigit till önskad nivå stängs kranen till nivåflaskan och mätningen startar. Mätningen sker på samma sätt som vid kompressometerförsöket, med skillnaden att det endast finns ett vattenståndsrör att läsa av. Vattennivån vid utloppssidan skall ligga över utloppskanalerna i stämpeln på provet och hållas konstant. Eftersom det endast finns ett vattenståndsrör ändras utvärderingen till

$$k = \frac{l \cdot A_r}{t \cdot A_p} \cdot \ln \frac{h_1}{h_2} \quad [3]$$

och h_1 och h_2 avläses enligt Figur 7. (Övriga parametrar enligt förklaring för ekvation [2])

Permeabiliteten kan mätas successivt efter flera efterföljande laststeg på samma prov. Man får då en kurva för hur permeabiliteten varierar med den relativa kompressionen, ε_v . Med ledning av provets torra volymvikt och korndensitet kan den relativa kompressionen räknas om till provets portal, e , vilket är den parameter som främst styr permeabiliteten i provet. Kurvorna för sambanden ε_v -log k och e -log k bildar normalt räta linjer, jfr Figur 10. Med ekvationen för dessa linjer kan permeabiliteten beräknas för varje stadium av sammantryckning (eller portal) hos provet.

Problemen med diffusion och läckage är mindre vid försök i ödometer än i kompressometer. Försök i ödometer kan därför utföras på prover med mycket låga permeabiliteter ($< 10^{-11}$ m/s). Tätheten i utrustningen kan dock inte kontrolleras på motsvarande sätt som i kompressometern.

Försök med kontinuerlig kompression

Försök med kontinuerlig kompression kan utföras som försök med konstant deformationshastighet, *CRS-försök* (*Constant Rate of Strain*), eller försök med konstant gradient, *CGT-försök* (*Constant Gradient Test*). I CRS-försöket komprimeras provet med en konstant hastighet, medan kompressionshastigheten i ett CGT-försök regleras så att skillnaden i portryck mellan provets undre och övre ändytor är konstant. Fler varianter av styrning av försöken finns, men CRS- och CGT-försök är de vanligaste i Sverige.

Utrustningen skiljer sig från den för stegvisa ödometerförsök i så mån att filtret under provet ofta är mindre och centralt placerat under provet, det finns ingen nivåflaska utan endast en avstängningskran för utloppet och vattenståndsröret är ersatt av en portrycksgivare, Figur 9. Utloppskranen stängs direkt efter provmonteringen och efter att alla kanaler i bottenplattan är fullständigt vattenmättade. Vattenavgång från provet kan sedan endast ske genom den övre filterstenen i stämpeln. Gradienten i provet skapas av den kontinuerliga kompressionen, som genererar ett porövertryck i provet och en gradient från den täta bottenytan till dräneringsranden vid filterstenen i stämpeln. Under försökets gång mäts provets kompression och portrycket i provets underkant med jämna tidsintervall och med hjälp av elektriska givare. Mätningen sker automatiskt med en datainsamlingsenhet, vilken i CGT-försök också styr deformationshastigheten med hjälp av de uppmätta värdena. Permeabilitetsmätningen i försök med kontinuerlig kompression skiljer sig från övrig permeabilitetsmätning på så vis att här sker vätskeströmningen ut ur provet under dess volymförändring medan övrig permeabilitetsbestämning avser vätskeströmning genom provet under konstant volym.

Efter försökets start fordras en viss tid och kompression hos provet innan portryck och deformationshastighet ställt in sig så att de anpassats och fullt ut motsvarar varandra. Försöken kan därmed endast utföras på prover som är så kompressibla att de trycks samman minst cirka 5 % och helst mer under försökets gång. Försöksbetingelserna får normalt inte ändras under försökets gång. C i såväl CRS som CGT står för ”constant” och detta skall uppfyllas. En plötslig förändring i kompressionshastigheten medför att icke-relevanta värden kommer att mätas under ett visst tids- och kompressionsintervall innan förhållandena åter

stabiliserats. Alla sådana förändringar måste därför undvikas, som i CRS-försök, eller vara mycket långsamma och gradvisa, som i CGT-försök.

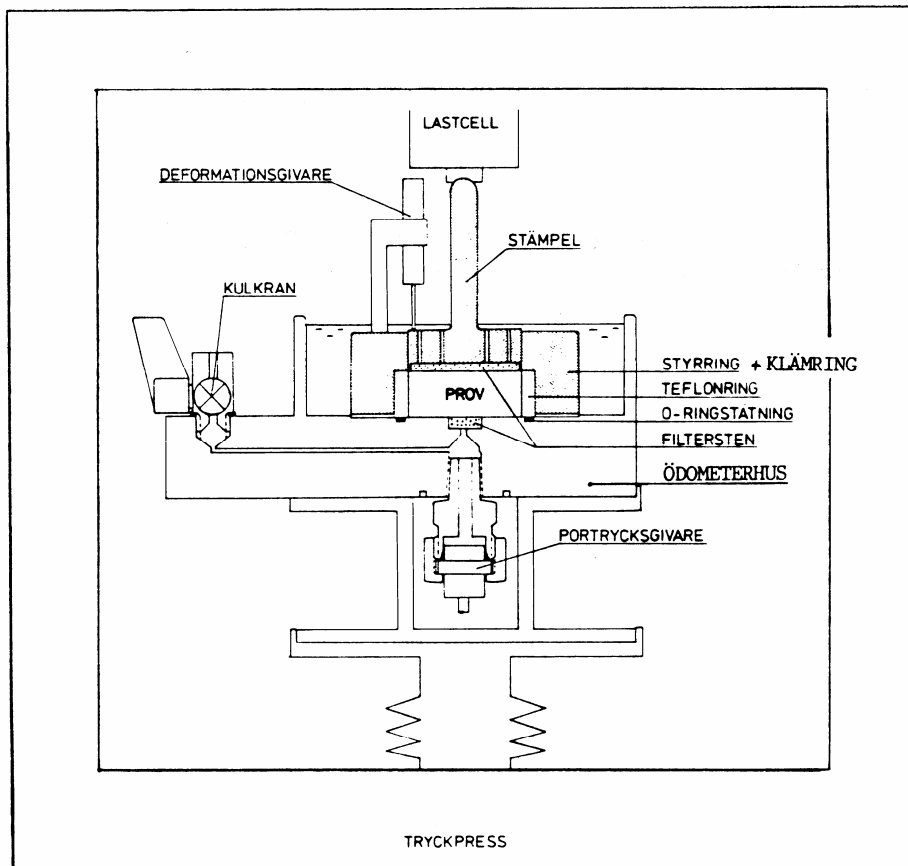


Fig. 9. Exempel på ödometer för försök med kontinuerlig belastning.

Vid ödometerförsök med kontinuerlig kompression utvärderas permeabiliteten enligt

$$k = \frac{d\varepsilon}{dt} \cdot \frac{\rho_w \cdot g \cdot h^2}{2 \cdot u_b} \quad [4]$$

där

- k = permeabilitet, m/s
- $d\varepsilon/dt$ = deformationshastighet, 1/s
- ρ_w = vattnets densitet, Mg/m³
- g = gravitationen, m/s²
- h = aktuell provhöjd, m
- u_b = övertryck vid provets underkant relativt tryckhöjden vid dess överkant, kPa

Denna utvärdering görs kontinuerligt och som resultat erhålls en kontinuerlig kurva över sambandet ε - $\log k$, se Figur 10. Ur denna kurva kan parametrarna k_i och β_k , vilka beskriver permeabilitetsvärdet vid försökets start och dess variation med provets kompression, utvärderas som visas i figuren.

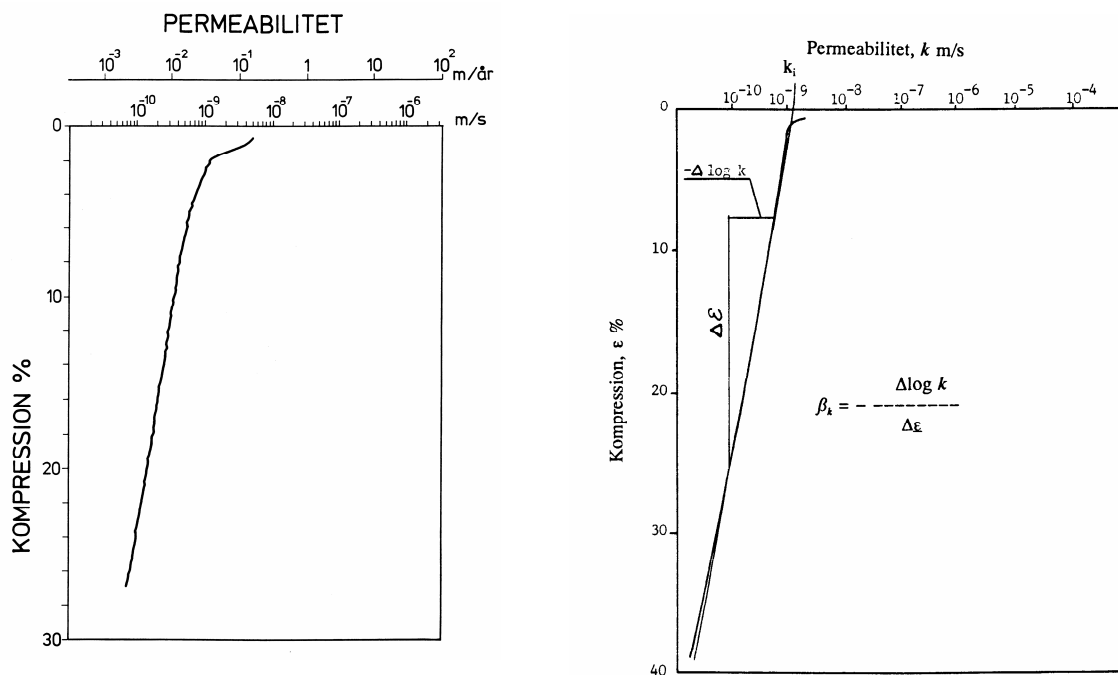


Fig. 10. Exempel på resultat från permeabilitetsbestämning i ett ödometerförsök med kontinuerlig belastning samt princip för utvärdering.

Utvärderingen bygger på vissa antaganden om portrycksfördelningen i provet, men inverkan av dessa antaganden är liten.

Försök med de enkla typerna av försöksutrustning, där dräneringen sker mot en fri vattenyta mot atmosfärstryck kan i princip endast användas för helt vattenmättade prover. För bestämning av permeabiliteten för vertikal grundvattenströmning i prover av ostörd finkornig jord som tagits under grundvattenytan är det den i särklass mest rationella metoden (såväl tekniskt som ekonomiskt). Detta gäller även motsvarande prover med organisk jord. Också för andra vattenmättade, finkorniga och relativt kompressibla material av alla slag kan det vara ett rationellt försöksalternativ. Utrustning för CRS-försök finns på de flesta geotekniska laboratorier i Sverige.

Försök med back-pressure

Används för icke vattenmättade finkorniga prover.

För prover med lägre vattenmättnadsgrad kan ödometern placeras i en cell i vilken ett mottryck kan appliceras i porvattnet och vattenmättnadsgraden därmed ökas. Komplexiteten i utrustningen ökar och tiden för vattenmättnad genom eventuell ökning av vattenmättnaden genom vattenströmning genom provet och genom applicering och anpassning till mottrycket tillkommer. I övrigt utförs och utvärderas försöket på samma sätt som de enklare varianterna. Utrustning för ödometerförsök med kontinuerlig kompression finns i flera varianter på marknaden, Figur 11.



Fig. 11. Exempel på utrustningar för ödometerförsök med kontinuerlig kompression i celler där mottryck kan appliceras i porvattnet.

Möjligheten att vattenmätta prover genom mottryck i porvattnet är begränsad, bland annat av vilka tryck apparaturen och givarna klarar av. Normalt skall vattenmättnadsgraden överstiga 85 % innan applicering av mottryck påbörjas. I ödometern finns ingen möjlighet att kontrollera vilken vattenmättnadsgrad som slutligen uppnås, (B-värdeskontroll som i försök i triaxialapparat eller permeabilitetscell kan inte utföras och gas som gått i lösning på grund av det höga trycket frigörs då detta släpps av och provet demonteras efter försöket). Man använder sig därför av mottryck som teoretiskt och erfarenhetsmässigt skall vara tillräckliga för en fullgod vattenmättnad. Vanligen använda mottryck visas i Tabell 4.

Tabell 4. Rekommenderat mottryck beroende på ursprunglig vattenmättnadsgrad. Interpolation kan göras mellan de angivna värdena.

Vattenmättnadsgrad S_r , %	Mottryck u_0 , kPa
100	0
95	300
90	600
85	900

Försök med kontrollerad vätskegenomströmning

Istället för att låta vatten strömma genom stegvist belastade prov i ödometrar genom applicering av en konstant gradient eller variabel tryckhöjd och mätning av den genomströmmade vattenmängden i vattenståndsror kan motsvarande försök automatiseras. Den undre filterstenen ansluts då till en vattenfylld cylinder med en invändig kolv och tryckmätare. Kolvens rörelse styrs så att den antingen rör sig med en konstant hastighet eller via en styrenhet så att portryckskillnaden mellan provets över och underytor hålls konstant. Under försöket registreras tid, kolvens rörelse och vattentrycket i kolven kontinuerligt och den vattenvolym som strömmar genom provet beräknas ur cylinderns tvärsnittsarea och kolvens rörelse.

Försöken kan utföras i såväl enkla ödometrar som ödometrar inbyggda i celler och med mottryck i porvattnet. Cylindrar med automatiskt styrda kolvar som kan programmeras för denna typ av försök finns på marknaden, Figur 12.



Fig. 12. Exempel på programmerbar tryck-volymkontroll.

Bestämning av permeabilitet i horisontalled

Används främst för prover med anisotrop struktur. främst horisontellt skiktade prover.

Permeabiliteten i naturlig finkornig jord varierar ofta med strömningsriktningen, dels om partiklarna i materialet är orienterade i en viss riktning, dels om det finns inbäddade horisontella skikt med avvikande permeabilitet.

Bestämning av permeabilitet i horisontalled i naturlig jord görs enklast genom att relativt stora ostörda prover tas upp. Ur dessa prover kan sedan mindre horisontella prover stansas eller trimmas ut och monteras i ödometern så att kompressionsriktningen och vattenströmningen sammanfaller med den horisontella riktningen hos provet in situ. Därefter utförs provningen på något av de sätt som beskrivits ovan. Denna typ av provning kan främst utföras på homogen lera eller organisk jord. Den kan också användas för jord med så tunna och frekventa inbäddade skikt att ett representativt prov och värde kan erhållas med den begränsade provstorlek som kan fås ut ur det upptagna provet och som kan monteras i den tillgängliga provningsutrustningen.

Försök med horisontell vattenströmning kan också utföras i en *Rowe-ödometer*, Figur 13. Denna består av en relativt stor ödometering (upp till 252 mm diameter finns på marknaden), en bottenplatta, ett gummimembran och ett trycklock. Vid bestämning av horisontell

permeabilitet placeras ett filter på ödometerringens insida och täcker hela dess yta. Ringen placeras på bottenplattan, vars släta basyta bestryks med ett tunt lager av fett för att täta mot provet. Provet monteras i ringen varvid så god vattenmättnad som möjligt tillses. En central drän installeras i provet, vanligen genom att ett hål borras genom provet och fylls med dränsand. Därefter läggs gummimembranet och trycklocket på och ödometerdelarna bultas ihop så att det blir tätt. I gummimembranets centrum finns ett fastvulkat rör, vilket går igenom trycklocket genom en tät bussning. Provet belastas genom att ett tryck appliceras mellan trycklocket och gummimembranet och det senare pressar mot provet. Ett mottryck i porvattnet kan anbringas genom filtret runt provet och via röret genom trycklocket och membranet. Den vertikala kompressionen i provet kan följas genom att mäta rørets vertikala rörelse. Den horisontella permeabiliteten mäts sedan genom att vattentrycket i den centrala dränen ökas och vattnet får strömma ut radiellt till provets periferi. Vid försök med lång varaktighet måste tryckmediet avpassas så att ingen diffusion sker genom membranet in i provet.

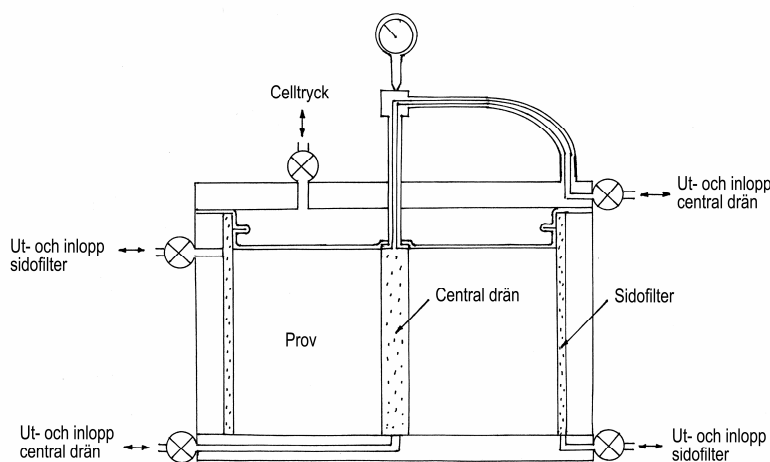


Fig 13. Rowe-ödometer, principskiss och foto.

Försöket är ovanligt och Rowe-ödometrar finns endast i enstaka exemplar i Sverige, men försökstypen ger en möjlighet att direkt mäta den horisontella permeabiliteten i mer komplext uppbyggda skiktade jordar eller kompositmaterial som saknas i övriga metoder.

Triaxialapparat och permeabilitetscell

Används främst för prover med låg permeabilitet då höga krav ställs på vattenmättnad och mätnoggrannhet.

Försök i triaxialapparat och permeabilitetscell är i princip lika och behandlas här i samma avsnitt. Skillnaden består i att en triaxialapparat är en utrustning som är avsedd främst för provning av hållfasthets- och deformationsegenskaper, i vilken provning av permeabiliteten också kan utföras, medan den enklare permeabilitetscellen endast är avsedd för den senare bestämningen.

Triaxialapparater ger större möjligheter att konsolidera proverna under kontrollerade förhållanden. Vertikallasten kan varieras skilt från horisontaltrycket, den axiella kompressionen av provet mäts och kan särskiljas från den radiella kompressionen och

vattenmättnadsgraden kan kontrolleras genom mätning av det så kallade B-värdet^{*)} eftersom utrustning för mätning av portryck ingår i apparaturen. Å andra sidan finns en viss konflikt mellan önskemålen i ett vanligt triaxialförsök om glatta ändytor, låg korrektion för membranspänningar och dräner längs provets utsidor som snabbar upp försöket och de krav som gäller för ett permeabilitetsförsök. Monteringsförfarandet och vissa detaljer i apparaturen måste därför ofta ändras och bytas ut för permeabilitetsförsök och utrustningen blir då snarast en avancerad permeabilitetscell.

Permeabilitetscellen är ofta enklare och saknar utrustning för reglering av vertikaltrycket samt mätning av vertikaldeformationen, Figur 14. Detta medför att endast ett allsidigt lika tryck kan appliceras på provet och dess kompression kan endast mätas som förändringar i volymen utpressat porvatten, alternativt mängden vätska som omger provet i cellen. Provets aktuella längd och tvärsnittsarea beräknas då med en antagen fördelningen mellan vertikal och radiell kompression. Volymförändringen bör vara liten för att felkällorna i detta förfarande skall kunna försummas. Permeabilitetsceller utrustas därför också ofta med en klen stång med vilken provhöjden kan mätas men som inte används för att lägga på någon axiell last. Permeabilitetscellen måste också förses med en extra utrustning för portrycksmätning om B-värdet skall kunna mätas.



Fig. 14. Exempel på permeabilitetscell och tillhörande reglerutrustning. Föremålen vid sidan av cellen är adaptrar för att kunna variera provdiametern.

Såväl cellerna i triaxialapparater som permeabilitetsceller består av en bottenplatta med en piedestal, ett toppstycke och en övre del med ett plexiglasrör och en topplatta som utgör cellens väggar och tak. Genom piedestalen och toppstycket går dräneringskanaler. I bottenplattan finns kanaler med anslutningsslangar till dräneringskanalerna i toppstycket samt en större kanal för inledning av tryckmediet i cellen. I topplattan finns en luftningsventil (och i triaxialcellen också en genomföring för en laststång).

^{*)} B-värdet mäts genom att in- och utloppskranar till porvattnet i provet stängs, provet utsätts för en allsidigt lika stor höjning av det omgivande trycket mot dess sidor och ändytor och den resulterande portrycksändringen i provet mäts. Förhållandet mellan portrycksökningen och ökningen av det yttre trycket anges som B-värdet. Detta skall vid full vattenmättnad vara nära 1,0. I praktiken uppnås sällan detta värde utan provet anses oftast vara vattenmättat då $B \geq 0,95$.

Före montering av ett prov väljs tätningsåtgärder och tryckmedium med avseende på provets förväntade permeabilitet och provningens förväntade varaktighet. För mycket korta provningstider på ett permeabelt material kan luft användas som tryckmedium. Luft diffunderar dock relativt snabbt genom gummimembran och vid försök som varar mer än några timmar ersätts luften med en vätska. För provningar med medellång varaktighet, några dagar, kan vatten användas som cellvätska. Vatten diffunderar också, om än långsammare, igenom gummimembran och vid längre provningar får ytterligare åtgärder övervägas. En sådan kan vara att använda dubbla gummimembran med en film av icke gummilösande fett emellan. Ett annat sätt är att använda en vätska som inte diffunderar igenom gummimembran och inte löser upp dem. Ricinolja och silikonolja är exempel på sådana vätskor.

Vid provning av låga permeabiliteter bör också gummimembranet vara föreberett genom att ha lagrats i vatten under minst ett dygn innan monteringen. Ett torrt gummimembran tenderar att långsamt suga vatten från provet.

Provet monteras på en filtersten på piedestalen. Det kan vara ostörda prover av naturlig jord, prover som före monteringen packats in i en packningscyliner eller tillverkats på annat sätt utanför cellen eller prover som tillverkas på plats på piedestalen. De naturliga och förtillverkade proverna ställs direkt på filterstenen på piedestalen och en filtersten och toppstycket läggs på provets överände. Denna typ av prover har normalt en hög vattenmättnadsgrad redan från start, och alla dräneringsslangar, filter och kanaler skall då vara vattenmättade före monteringen. Kranarna skall dock vara stängda så att provet inte kan suga vatten eftersom det då dels okontrollerat kan ändra volym, dels kan kollapsa. Provet innesluts i ett gummimembran som förs ned över provet med en speciell cylinder, vilken sedan avlägsnas. Gummimembranet tätas mot piedestalen och toppstycket med hjälp av utanpåliggande o-ringar.

Vid tillverkning av prover på piedestalen används en delbar packningscyliner. Gummimembranets nederkant träs över det undre filtret och piedestalen och tätas mot denna. Packningscylindern monteras runt piedestalen och gummimembranet, och membranet sugas sedan ut mot cylinderns väggar. Provet packas in på önskat sätt, viket kan vara torrt, fuktigt eller vattenmättat, och till önskad lagringstäthet. Möjligheten att få en mycket fast lagring är begränsade på grund av gummimembranet som dels fjädrar dels skall skyddas. Denna möjlighet är ytterligare begränsad i vattenmättad finkornig jord där möjligheten till packning är generellt liten. Efter inpackning avjämnas provets överyta, filterstenen och toppstycket läggs på och toppen av gummimembranet förs över och tätas mot toppstycket. Därefter avlägsnas packningscylindern. För mycket löst lagrade prover fordras ofta att ett undertryck appliceras i porvattnet (eller porgasen) för att provet skall hålla ihop och stå upp i detta skede.

Plexiglasröret och toppplattan förs på och cellen skruvas ihop så att den blir tät. Cellen fylls med tryckmediet och ett allsidigt tryck läggs på. Det allsidiga trycket skall vara tillräckligt högt för att provet skall hålla ihop och det skall i alla senare skeden av vattenmättnad, konsolidering och provning med god marginal överstiga portrycket i alla delar av provet.

Proven vattenmätts. För torra prover kan luften i provet först ersättas med koldioxid. I torra och fuktiga prover får sedan vatten sakta strömma upp genom provet tills inga gasbubblor längre kan upptäckas i dräneringsledningarna. För samtliga prover appliceras sedan ett erforderligt högt mottryck i portrycket. Detta bedöms ur Tabell 3. Det skall observeras att prover inte kan vattenmätts med mottryck i förväg eftersom gas som gått i lösning på detta

vis frigörs då vattentrycket åter sänks. Påläggning av mottryck skall ske i små steg under samtidig ökning av celltrycket så att det senare alltid är minst cirka 20 kPa högre. Varje steg får vara en viss tid innan nästa steg läggs på eftersom det tar en stund innan tryckutjämning hinner ske i provet. Efter att det fulla mottrycket fått verka ett tag kan B-värdet mätas, se förklaring ovan. Är detta tillfyllest kan den eventuella ytterligare konsolideringen och permeabilitetsprovningen börja, i annat fall kan mottrycket höjas ytterligare.

Under påläggning av det första celltrycket, vattenmätning och konsolidering kontrolleras provets höjd- och volymändring i görligaste mån. Provlängd och provarea under permeabilitetsprovningen beräknas med ledning av de uppmätta dimensionerna efter monteringen och de förändringar som uppmäts därefter.

Om inget mottryck används i porvattnet kan mätningarna utföras som försök med konstant tryck och mätning av genomströmmad vattenmängd i mätrör eller som försök med variabel gradient med mätning i vattenståndsrör och utvärderas med ekvationerna [1],[2] eller [3] beroende på försöksarrangemang. Vid påläggning av gradienten, vilket normalt sker genom att skapa ett högre väsketryck i provets underkant än i dess överkant måste tillses att det högre portrycket fortfarande är betryggande lägre än celltrycket.

Vid användande av mottryck fordras tre separata reglerade trycksystem; ett för celltryck, ett för trycket i tilloppsledningen och ett för trycket i utloppsledningen. Volymändringarna i provet och/eller cellen under konsolideringsfasen mäts i vattenståndsrör i trycksystemen och den genomströmmade vätskevolymen mäts i de två rör som ingår i trycksystemet för porvattnet. Ett kransystem gör att ledningarna kan parallellkopplas, separeras och vid behov fyllas på eller tömmas under processens gång, Figur 15.

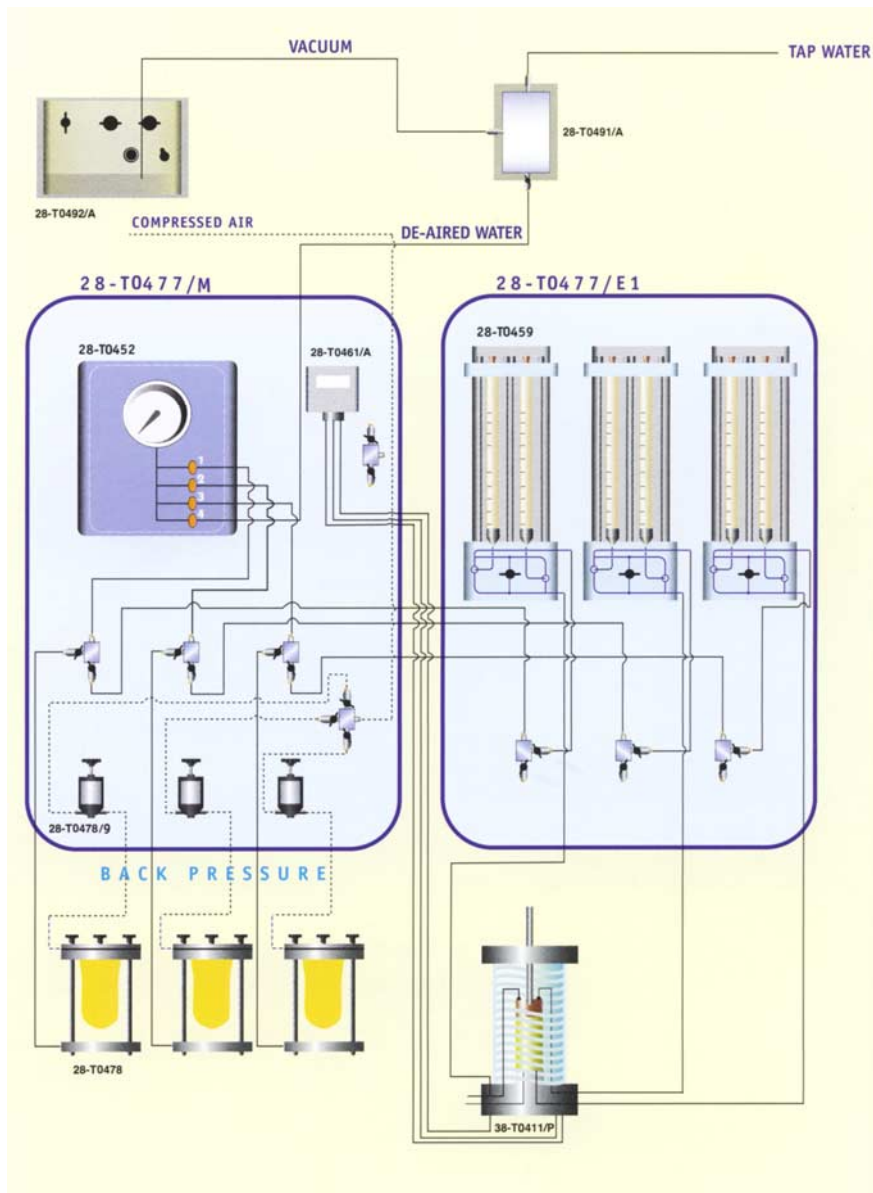


Fig. 15. Exempel på kopplingschema för kontrollsystemet för tryck och volym vid ett försök med mottryck i porvattnet i en permeabilitetscell.

Mätningarna kan automatiseras och då kompletteras vattenståndsrören i trycksystemet för portryck av elektriska volymmätare och manometrarna i samma system av elektriska tryckgivare. I vissa fall kan det också bli aktuellt med specialcylindrar som separerar giftiga och förorenande ämnen som lakas ur proven från resten av trycksystemet, Figur 16.



Fig. 16. Exempel på permeabilitetscell med cylindrar för uppsamling av utströmat porvatten som delar i trycksystemet.

Mätningarna pågår tills stabila och pålitliga värden erhålls. I finkornig jord tar detta en avsevärd tid eftersom den genomströmmande vätskemängden är liten och en viss tid åtgår innan trycken i provet ställt in sig. Dessutom medför varje tryckändring att det, beroende på hur denna görs, uppstår en viss kompression och/eller svällning i olika delar av provet. Dessa rörelser måste avstanna innan rättvisande värden på permeabiliteten erhålls.

Försöken kan också utföras med programmerad utrustning för tryck- och volymkontroll, se Figur 11. I detta fall bör endast försök med kontrollerad gradient genom provet utföras eftersom relationen mellan maximalt portryck och celltrycket måste vara under kontroll.

Minsta läckage, diffusion eller volymförändring har stor inverkan på resultaten i försök på material med låg permeabilitet. I sådana försök bör därför såväl in- som utströmmande vätskevolym mätas och kontroll av att dessa motsvarar varandra samt att vätskevolymen i portrycksystemet är konstant utföras. Under dessa förutsättningar kan i princip hur låga permeabiliteter som helst bestämmas, förutsatt att erforderlig tid ges.

Triaxial- och permeabilitetsceller finns på marknaden i storlekar upp till cirka 250 mm diameter. Ännu större celler har byggts i enstaka exemplar för speciella ändamål. Det finns t.ex. triaxialutrustning som inrymmer hela segment av upptagna platstillverkade kalk/cementpelare med 500 mm diameter och en permeabilitetscell med 1m diameter som tillverkats för att kunna mäta representativa värden i sprickig torrskorpelera och lermorän.

MER ATT LÄSA

ASTM D5084. Standard Test Method for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using Flexible Wall Permeameter.

ETC5 (1998). Recommendations of the ISSMGE Regional European Technical Committee 5 For Geotechnical Laboratory Testing. Beuth Verlag.

SS 02 71 11. Svensk standard för geotekniska provningsmetoder – Bestämning av permeabilitet.

SS 02 71 26. Svensk standard för geotekniska provningsmetoder – CRS-försök – ödometerförsök.

Permeabilitet och kapillaritet. Förslag till geotekniska laboratorieanvisningar, del 8. Hans Fagerström och Carl Erik Wiesel i samarbete med SGF:s laboratoriekommitté. Byggforskningens informationsblad B7:1972.

Nordtest Technical Report 254 – Bestämning av permeabilitet hos restprodukter och jord in situ och på laboratorium. Marcus Sjöholm, Peter Carlsten och Pär Elander (1994), Nordtest, Esbo.

Naturvårdsverket (1999). Metodik för inventering av förorenade områden - bedömningsgrunder för miljö kvalitet, Naturvårdsverket, Rapport 4918.

Tavenas, F., LeBlond, P., Jean, P. and Leroueil, S. (1983). Permeability of natural soft clays, 1: Methods of laboratory measurement. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 20, No. 4, pp 629-644.

Tavenas, F., Jean, P., LeBlond, P. And Leroueil, S. (1983). Permeability of natural soft clays, 2: Permeability characteristics. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 20, No. 4, pp 645-660.

Zimmie, T. F. (1981). Geotechnical Testing Considerations in the Determination of Laboratory Permeability for Hazardous Waste Disposal Siting. ASTM STP 760.

Sällfors, G. (1975). Preconsolidation pressure of soft, high-plastic clays. Avhandling, Chalmers tekniska högskola, Inst. f. Geoteknik, Göteborg.

Sundsten, M. (2004). Hydraulic conductivity of saturated sand-bentonite mixtures. Avhandling, Chalmers tekniska högskola, Inst. f. Geoteknik, Göteborg.

SGF Notat

- 1:2004** Packning och packningskontroll av blandkornig och finkornig jord
- 2:2004** Direkta skjuvförsök – en vägledning
- 3:2004** Laboratorieutrustningar med stora provdimensioner – en sammanställning
- 1:2005** Våra framtida geotekniska arbetsredskap – en introduktion

Svenska Geotekniska Föreningen (SGF) bildades 1950 och består av drygt 700 enskilda medlemmar, med minst två års praktisk erfarenhet av geoteknik. Dessutom ingår ca 30 korporativa medlemmar i form av institutioner, högskolor, myndigheter, konsult- och entreprenadföretag samt tillverkare inom det geotekniska området.

SGF har till ändamål att främja utvecklingen inom geoteknik med grundläggning med föredrag, diskussioner och kommittéarbeten samt att samarbeta med svenska, nordiska och övriga internationella organ med liknande inriktning.

Föreningen företräder i Sverige den internationella föreningen, the International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE).

I SGF:s Rapport- och Notatserier utges föreningens metodbeskrivningar, monografier och dokumentation från konferenser, temadagar m.m.