



**SVERIGES
LANTBRUKSUNIVERSITET**

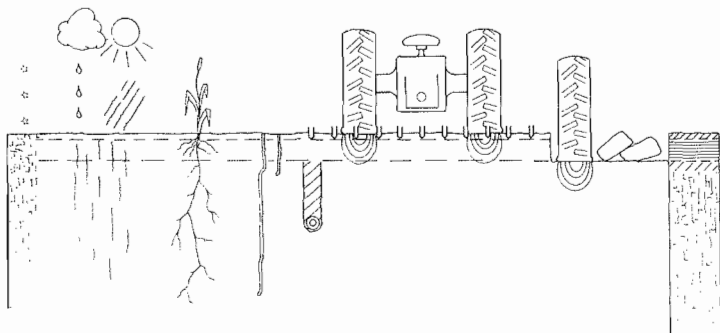
MARKPACKNING OCH ROTMILJÖ

Packningsbenägenheten hos svenska åkerjordar
Förändringar i markens funktion orsakade av packning

SOIL COMPACTION AND ROOT ENVIRONMENT

Compactability of Swedish cultivated soils
Alterations in soil function caused by compaction

JANNE ERIKSSON



**Institutionen för markvetenskap
Avdelningen för lantbrukets hydroteknik
Swedish University of Agricultural Sciences
Department of Soil Sciences
Division of Agricultural Hydrotechnics**

**Rapport 126
Report
Uppsala 1982
ISSN 0348-1816
ISBN 91-576-1354-0**

JANNE ERIKSSON, Institutionen för markvetenskap/Lantbrukets hydroteknik,
Sveriges lantbruksuniversitet, S-750 07 Uppsala, Sweden

MARKPACKNING OCH RÖTMILJÖ Packningsbenägenheten hos svenska åkerjordar
Förändringar i markens funktion orsakade av packning

SOIL COMPACTION AND ROOT ENVIRONMENT Compactability of Swedish cultivated
soils Alterations in soil function caused by compaction

Akademisk avhandling som för avläggande av agronomie doktorsexamen kommer
att offentligt försvaras i sal K, Undervisningshuset, Sveriges lantbruks-
universitet, Uppsala, fredagen den 8 april 1983, kl 09.30.

Abstract

The study concerns different ways to quantify the extent of adverse impact on the soils by the field traffic in intensive farming. Forces that influence soil structure decrease in frequency and intensity with depth in the soil. An equilibrium as regards structure is attained in the profile, whereby structure-forming natural processes and destructive forces from tractors and machinery are in balance. Of major interest is the influence in the upper meter of the soil and the extent to which long-term shifts in the equilibrium occur in this part of the profile.

An account is given of the deformation properties in 19 soil profiles representing main types of Swedish soils. The compactability of the soil in natural layering has been registered by the compressometer method, i.e., one dimensional compression of cylindrical soil cores taken from the field in undisturbed conditions. The measurements were made in the 0-800 kPa interval, which largely covers the pressure range in a soil profile applied by vehicles. The method chosen has been designed for use in rational measurement routines permitting high analytical capacity. The deformation properties of the individual soil types are presented in diagrams illustrating the relationship between pressure applied and porosity obtained for different soil layers. Mathematical expressions of the relationship between porosity and the exponential of applied pressure are also given. The compaction properties were found to be related to the porosity and the pore size distribution that different arable soils normally possess.

Secondly, detailed studies of the breakdown of the macro-pore system when loaded were conducted in combination with investigations of the influence on soil aeration and root growth conditions. A method is described whereby the reactions of roots in soils compacted to different degrees can be visualized. In clay soils, for example, an intact system of macro-pores with good continuity, such as cracks, worm-holes and root channels, is of decisive importance for the root environment. When heavy machinery is used the uppermost part of the soil will receive heavy and frequent pressure applications which foremost affect this system of macro-pores. The deterioration of the pore space is successive, but the different function studies indicate a critical level of applied pressure around 200 kPa.

Keywords: Soils, Soil compaction, Soil pore system, Soil water, Soil air relations, Root pressure, Compressometer.

ISBN: 91 576 1354 0

Tryckort: Uppsala

Tryckår: 1982

Föreliggande avhandling utgör en delredovisning av de studier under temat marken och maskinerna som bedrivits i olika perioder sedan 1953 inom försöksverksamheten vid avdelningen för lantbrukets hydroteknik. Under 1950- och 1960-talen avsåg dessa studier markens bärighet och framkomligheten för traktorer och maskiner. En samlad redovisning av markbärighetsstudierna gjordes bl.a. i min licentiatavhandling. Med den växande körmängden i jordbruket framstod alltmer också vikten av en belysning av fordonens markpåverkan och följd effekterna på dräneringens funktion och på grödans avkastning. Studierna av maskinernas markpåverkan med början under 1960-talet formades så att de anknöt till de fortlöpande markfysikaliska studierna vid avdelningen för lantbrukets hydroteknik. Systematiska studier av markens hållfasthetsegenskaper främst packningsbenägenheten vid statisk och dynamisk belastning har utförts på jordprofiler representerande viktiga jordtyper. Utöver ett tillskott av markmekanisk metodik och framtagande av data för belysning av de dynamiska skeendena i markrummet har undersökningen avsett ge underlag för bedömning av skaderiskerna i markprofilen vid olika körintensiteter i jordbruket och av tillåtna markpåkänningar för att upprätthålla markens långsiktiga produktionsförmåga.

Skilda aspekter av mark-maskinproblemet har under den gångna tiden även bearbetats vid bl.a. Avdelningen för jordbearbetning, Institutionen för markvetenskap, Jordbrukstekniska institutet och av Institutionen för arbetsmetodik och teknik. Den allsidiga belysning av maskinernas markpåverkan som erhållits genom dessa samfälliga studier har varit värdefull förutom för svenskt jord- och skogsbruk också för militär verksamhet och anläggningsverksamhet. Studierna har också blivit internationellt uppmärksammade.

Under den tid mitt arbete med markpackning har pågått har det rönt många influenser av övrig pågående forskning och försöksverksamhet inom området markfysik och lantbrukets hydroteknik. Denna verksamhet har kännetecknats av stor enhetlighet genom kontinuitet i ledningen; på försökssidan professor August Håkansson, statsagronom Gösta Berglund, professor Waldemar Johansson, på forskningssidan av professor Sigvard Andersson och framlidne Paul Wiklert. Här skall också nämnas statsagronom Inge Håkansson vid avdelningen för jordbearbetning. Jag vill tacka alla dessa för deras samfälliga bidrag till mark-vatten-området som på olika sätt utgjort grund också för detta arbete. Jag vill särskilt tacka August Håkansson och Gösta Berglund för stöd i avhandlingsarbetet och deras beredvillighet att genom omfördelning av arbetsuppgifter inom avdelningen ge mig odelad tid för skrivandet.

I ett arbete av den karaktär det här varit fråga om, med en omfattande metodutveckling och insamlande av material från fältet under en följd av år, har många medarbetare inom institutionen deltagit. Lave Persson har lett utformningen av försöksapparaturen. Detta har skett med teknisk skicklighet och med stor förståelse för mätuppgiften. Förutom för mätarbetet inom denna undersökning kommer den apparattekniska utvecklingen att ha värde för fortsatta markmekaniska studier.

Jan Lindström, Christina Öhman och Cathrine Zaine har noggrant och tålmodigt utfört olika delar av det mycket omfattande mätarbete som kombinerade markfysikaliska och markmekaniska studier innebär. Dag Åstrand vid Lantbruksuniversitetets dataavdelning har format de dataprogram enligt vilka den matematisk-statistiska bearbetningen och tabuleringen av grunddata skett. Värdefullt biträde i databehandlingen har också lämnats av Gösta Ljung och Ander Bjerketorp. Hans Johansson har genomfört den rutinmässiga bearbetningen sammanlagt renritat allt figurmaterial. Nigel Rollison har till engelska översatt figur- och tabelltexter samt sammanfattning. Margit Zetterberg har renskrivit och skickligt redigerat manuskriptet med figurer till tryckfärdigt skick. Samtliga tackar jag för värdefull hjälp och omsorgsfullt utfört arbete.

Till min hustru Ingegerd vill jag slutligen uttrycka mitt innerliga tack för tålmod och uppmuntran genom åren.

1. UNDERSÖKNINGENS BAKGRUND OCH SYFTE	5
Undersökningens allmänna uppläggning och arbetsmetodik	8
2. MEKANISKA EGENSKAPER HOS JORDAR	9
Spänningar och deformationer i mättad och omättad jord	10
Packningsförloppet i omättad jord	12
3. METODIK VID MÄTNING AV PACKNINGSBENÄGENHETEN HOS JORD	14
Allmänt	14
Kompressometeranläggning för statisk belastning	16
Provcylindrar	16
Stativ med tryckpressar och manöverdon	16
Tryckregleringscentral	18
Tryckplattor och mätton för avläsning av deformationen	19
Kalibrering av anläggningen	19
Mätprocedur vid kompressometerprov	20
Belastnings- och tidsschema	20
Bearbetning av kompressionsdata	21
Kompressometeranläggning för dynamisk, pulserande last	22
4. JÄMFÖRELSE AV PACKNING UNDER STATISK LAST OCH DYNAMISK, PULSERANDE LAST	25
Redovisning av enskilda lokaler	25
Ultuna, Uppsala län	25
Grävsta, Uppsala län	29
Sätuna, Uppsala län	30
Packning och relaxation vid dynamisk och statisk last	31
Några sammanfattande synpunkter	32
5. PACKNINGSBENÄGENHETEN I ETT ANTAL SVENSKA ÅKERMARKSTYPER	33
Några data över porositet och porstorleksfördelning i svenska åkerjordar som bakgrund till deras deformationsegenskaper	33
Resultat av markmekaniska profilstudier	38
Redovisningsformer av enskilda profiler	38
$n = f(p)$ -diagrammet	38
$n = f(z, p)$ -diagrammet	41
$n_p = f(n_o)$ -diagrammet	42
$\mathcal{E} = f(p, t)$ -diagrammet	42
Sammanfattning av profilernas mekaniska egenskaper	62
Sambandet mellan porositet, porstorleksfördelning och porvolymminskning vid belastning	67
Leriga jordar, lättleror och lättare mellanleror	67
Styva leror	68
Mycket styva leror	68
Gyttjeleror	68

6. TRYCKTILLSKOTT - PORSTORLEKSFÖRDELNING	73
Egna undersökningar	73
Grävsta, Uppsala län	74
Sätuna, Uppsala län	75
Packningsinfluens i Sätunaprofilen	76
Jämförelse av beräknad och uppmätt packningsgrad i Sätunaprofilen	78
Packning in situ under extremt stora ytlaster	82
P1 Enköping, Uppsala län	82
Packning in situ under normala och små ytlaster	84
Resultat	85
Stensfält	85
Skultorp	86
7. TRYCKTILLSKOTT - LUFTHUSHÅLLNING	90
Samband mellan diffusion och luftgenomsläpplighet	93
Egna undersökningar över packningens inverkan på markventilationen	95
Resultat	96
Ultuna	96
Säby	97
8. TRYCKTILLSKOTT - PENETRATIONS MOTSTÅND	99
Egna undersökningar	101
9. TRYCKTILLSKOTT - ROTTILLVÄXT	103
Egna undersökningar	104
Metodik	104
Resultat	104
Ultuna	104
Säby	109
10. SAMMANFATTANDE DISKUSSION	112
Mekaniska egenskaper hos jordar	113
Markprofilen och packningsprocessen	114
Tillämpligheten av använd metodik för mätning av markpackningen	115
Några sammanfattande synpunkter på resultaten	116
Packningsbenägenheten i relation till porstorleksfördelningen	117
SAMMANFATTNING	121
SUMMARY	124
LITTERATUR	134

Janne Eriksson

1. UNDERSÖKNINGENS BAKGRUND OCH SYFTE

Under svenska klimatförhållanden är en reglering av markvattnet genom dränering av avgörande betydelse för markens brukande och en god markmiljö. Under de senaste 30 åren har forsknings- och försöksverksamheten rörande markavvattningsens förutsättningar, teknik och ekonomi varit omfattande. Redan 1947 organiserades en särskild avdelning för dräneringsförsök knuten till dåvarande institutionen för agronomisk hydroteknik. I dräneringsförsök vid denna avdelning har klargjorts olika slag av dräneringseffekter (Håkansson 1960, 1961). Behövlig intensitet på dränering inom olika mark- och klimatområden bestäms främst av skördeutfallet. Vid bedömningen tillkommer emellertid två viktiga faktorer; dräneringens inverkan på upptorkningen och därmed packningsbenägenhet och rotmiljö främst under våren och dess inverkan på bärigheten främst under hösten. Under den 30-årsperiod som dräneringsförsöken löpt har upptorkning och bärighet noga följts i fältförsöken dels genom observationer av framkomligheten dels genom markfysikaliska och markmekaniska studier i fält och på laboratorium. På 50-talet orsakade dålig bärighet så gott som årligen skördebesvär särskilt i västra Sverige - fem år kunde anföras ha utomordentliga svårigheter 50, 51, 53, 54 och 57. 1960-talet inleddes med ett år med stora skördesvårigheter i östra Sverige och en särskild utredning gjordes över orsakerna i Uppsala län (Berglund 1961).

Av försök och undersökningar under 50-talet framstod klart att dränering är en nödvändig åtgärd för att minska och bemästra de uppenbara olägenheter som dålig bärighet medför. Det konstaterades att godtagbar bärighet på fälten erhålles genom att dräneringsintensiteten, främst dikesavstånden, väljes så att matjorden avdräneras snabbt (1 till 3 dagar efter ett större regn) och att grundvattenytan därefter sänks till ett läge av minst 40 cm under markytan (Eriksson 1957). I detta avdränerade tillstånd tål emellertid marken endast begränsade påkänningar till vilka maskinerna måste anpassas (Eriksson 1960). Under 50-talet skedde också genom influenser från bl.a. dräneringsförsöksverksamhet en utveckling i detta syfte av däck- och maskinutrustning inom jordbruket. Bland annat utvecklades det s.k. lågprofildäcket. Detta däck som först formades som bärande och drivande däck

i skördetröskor, har i olika former fått utomordentlig betydelse i både lantbruket och skogsbruket. Under 1960-talet kom de självgående tröskorna med stora drivande hjul varvid ytterligare samstämmighet mellan jordens bärkraft i dränerat skick och maskinernas framkomlighet erhöles. Det har dock under såväl 60- som 70-talet förekommit år då situationen varit kritisk vid spannmåls- och sockerbetsskörd. Kraven på dränering och maskinernas framkomlighet har samtidigt successivt höjts av den anledningen att mekaniseringen kommit att utgöra en viktig del i effektiviseringen och rationaliseringen av svenska jordbruket. Med de allt tyngre fordonen framstod vikten av en ytterligare belysning av fordonens markpåverkan och följd effekterna på dräneringens funktion och på grödans avkastning. Utöver markens bärighet togs också markens packningsbenägenhet upp för granskning. Enligt en ny fältmetodik studerades matjordens struktur-dynamik och packningsvariation under året (Andersson och Håkansson 1963, 1966). Denna problematik blev 1963 föremål för fördjupad och utvidgad belysning inom den då nybildade avdelningen för jordbearbetning (Håkansson 1966).

Inom försöksavdelningen för hydroteknik fortsatte studierna av fordonslasters påverkan av strukturen anknutet till de fortlöpande allmänna markfysikaliska studierna vid institutionen. Detta har skett inom ett projekt benämnt Fordonslast - tryckskador inom programmet Åkermarkens detaljavvattning. Projektet har avsett att belysa olika jordars packningsbenägenhet vid varierande vattenhalt i nivåer ned till en meters djup under markytan. Resultaten avser att ge underlag dels för en bedömning av skaderiskerna i profilen vid tunga körningar med inverkan på markens dräneringsegenskaper och rotmiljö dels för en bedömning av gränsvärden för tillåtna markpåkänningar till ledning för utformningen av maskin- och transportutrustning.

Den allmänna utvecklingen inom jordbruket under 70-talet mot ytterligare större enheter av maskiner, transportfordon och jordbearbetningsredskap föranledde Jordbrukstekniska Institutet att ta upp undersökningar för att belysa den tekniska utvecklingen och möjligheterna att modifiera denna för att minimera markpackningen (Danfors 1970, 1974). En samlad bild av vad man kommit fram till ifråga om jordpackning vid Institutionen för markvetenskap och JTI gavs 1974 i en skrift benämnd "Jordpackning - markstruktur - gröda" (Eriksson, Håkansson, Danfors 1974). I denna angavs också riktlinjer för hur packningsproblemen kan angripas. Meddelandet översattes 1975 till engelska av United States Department of Agriculture, Agricultural Research Service (USDA, ARS).

Internationellt har markskador i det intensiva jordbruket under den diskuterade perioden från 1950 också varit fortlöpande under observation, framförallt inom den humida, tempererade klimatzonen i övrigt, såsom i Nord-Europa och Nord-Amerika. En rad länder har haft anledning att i samband med våtår och besvärliga bruknings- och skördeförhållanden ta upp frågeställningar om marken och maskinerna. En samlad större översikt återfinns i "Compaction of Agricultural Soils" Barnes et al. ed (1971). För amerikanska förhållanden finns också redovisningar av Chancellor (1976) och Voorhees (1977). Från nord-europeiska länder och öststaterna har vid skilda tillfällen rapporterats skördeskador till följd av brister i dränering och till följd härav dålig bärighet. I England förelåg 1968-69 katastrofala skördeförhållanden och uppkom stora markskador varvid tillsattes en särskild statlig expertkommitté för att granska mark- och dräneringsfrågor i det moderna mekaniserade jordbruket. En analys av sakiäget och åtgärdsprogram återfinns i rapporten "Modern Farming and the Soil" från Agricultural Advisory Council (1970). Soane et al. (1980/81-82) ger i tidskriften "Soil and tillage research" en översikt över de senaste årtiondenas arbeten från i första hand de humida, tempererade klimatområdena över hur markpackning kan mätas, bedömas och kontrolleras.

I tropiskt lantbruk uppmärksammas också alltmer risken av markskador vid mekanisering. Följderna av packning i profilens övre del och sänkt vattengenomsläpplighet blir i tropiskt nederbörds klimat ännu ödesdigrare. Den förändrade markfunktionen leder till ökad ytavrinning och erosion med stora jordförluster. I tropiskt lantbruk bör markpackningen ses som en del av den allmänna markförsämringen som i sina olika yttringar utgör ett allvarligt hot mot världens markresurser (FAO 1979). Exempel på samband mellan mekanisering och markförsämring rapporteras av Trowse och Humbert (1961), socker-rörsodling, Hawaii; av Eriksson (1968), spannmålsodling, Etiopien och av Kemper och Derpsch (1979), majs och sojabönor, Brasilien.

Markpackning och markförsämring behandlades under 1980 vid två internationella seminarier dels Symposium on Subsoil Compaction, Uppsala (Håkanson et al. 1980), dels EEC Seminar on Soil Degradation, Wageningen. I summeringen av dessa seminarier konstaterades att maskinernas negativa markpåverkan medför problem i växtodlingen och markvården. Utöver kontinuerlig försöksverksamhet till ledning för en maskinutveckling i bättre samklang med marken framhölls behovet av grundläggande studier av markpåverkan. I Wageningen-seminariet rekommenderades att prioritering bör ske av forskning som syftar till ett klarläggande av de processer som leder till fysikalisk markförsämring (physical soil degradation) och som möjliggör för-

utsägelse av inverkan på markstruktur och växtmiljö. Den här föreliggande undersökningen är avsedd att belysa nämnda frågeställning vad avser packningens influens på markens byggnad och funktion.

Undersökningens allmänna uppläggning och arbetsmetodik

Undersökningen har varit formad med ett integrerat markfysikaliskt och markmekaniskt arbetssätt. Den har drivits efter tre huvudlinjer

- utformning av metodik för mätning av deformationsegenskaperna i matjord och alvdelen av torrskorpan
- en inventering av packningsbenägenheten i ett antal åkerjordsprofiler
- en analyserande och generaliserande del av packningens inverkan på markens byggnad och funktion.

En jords kompressionsegenskaper studeras på laboratoriet i regel vid förhindrad sidoutvidgning. Många situationer i fält, t.ex. då en fordonslast verkar på marken, motsvarar detta fall. Provet uttages i cylindrar med ett förhållande mellan höjd och diameter av omkring 1:3. Mätningen sker i en s.k. kompressometer, varvid provet placeras mellan dränerande keramiska plattor och belastas. Synonyma namn på mätanläggningen är ödometer och konsolidometer. Vid kompressionsmätning påföres provet ett normaltryck och kompressionen registreras som funktion av tiden. En initial last av ex. 25 kPa lägges på. Vid varje lastökning fördubblas normaltrycket i stegen 50, 100, 200, 400 och 800 kPa. Belastningstiden i denna undersökning har reducerats till 1 timme. Ur mätdata beräknas primärt den relativa kompressionen, ϵ , dvs. höjdminskningen i procent av provets utgångshöjd. Vidare kan den till packningsgraden svarande porositeten (n) eller portalet (e) beräknas. En serie samband kan sättas upp och granskas. De primära är sambandet mellan relativ kompression-tid, som ger "tidskurvan" och sambandet mellan relativ kompression-tryck som ger "kompressionskurvan".

För projektets genomförande har avdelningen byggt ut de markmekaniska mätresurserna bl.a. med en kompressometeranläggning med 10 pneumatiskt manövrerade mätenheter för statisk last samt en mätenhet för dynamisk, pulserande last. Den pulserande belastningen i den senare mätenheten kan varieras i varaktighet i syfte att efterlikna vissa i praktiken förekommande belastningsfall med traktorer, vagnar och redskap.

Undersökningen avser mark i naturlig lagring. Östörda prover har tagits ut enl. metoder utformade för markfysikalisk analys (Andersson 1955). Systematiska studier av hållfasthetsegenskaperna vid statisk belastning har ut-

förts på ett antal jordprofiler representerande viktiga jordtyper. Kompressionens storlek vid belastningssteg från 0-800 kPa har uppmätts vid ett vattenavförande tryck (tension) av dels 0,05 m dels 6 m vattenpelare. Profilerna har därjämte analyserats ifråga om bl.a. porvolym och porstorleksfördelning. Detta i syfte att belysa hur stor del av porvolymen som påverkas vid i marken förekommande trycktillskott av traktorer och tungt lastade vagnar och att även närmare belysa vilka delar av porsystemet som påverkas. Ett viktigt gränsvärde för tillåtna markpåkänningar som sökes i denna jämförande analys av mätdata är det tryck vid vilket det för växt-rötterna framkomliga porsystemet destrueras. Till detta porsystem brukar man vanligen räkna porer större än 0,03 mm. Här har också en serie specialstudier satts in för kontroll av rotmiljön i prover med olika statiskt och dynamiskt orsakad packningsgrad. Det är dels mätning av luftgenomsläpplighet och penetrationsmotstånd och dels direkt mätning av rotpenetration vid odling enligt en modifierad form av vid vissningsgränsbestämning tillämpad metodik.

2. MEKANISKA EGENSKAPER HOS JORDAR

En ändring av belastningen på ett givet material leder till dess deformation. Den i huvudsak granulära karaktären av jordmaterial medför att de visar stora och i tiden utdragna deformationer beroende på porositet, permeabilitet och partikelbindningar. De karakteristika som belyser storleken och hastigheten på deformationen i jord benämnes mekaniska egenskaper. Två viktiga sådana egenskaper är packningsbenägenhet och skjuvhållfasthet. Kunskap om jordars mekaniska egenskaper, dvs. reaktionen för pålagda spänningar, har utvecklats i första hand inom geotekniken för lösande av byggnadstekniska problem t.ex. grundläggning i lösa avlagringar. Basen för jordmekaniken är en jordmateriallära med samma begrepp som inom allmän marklära och markfysik (se t.ex. Hansbo 1975). Kornskelettets byggnad skiftar med texturen dvs. ingående partikelfraktioner och med överlagrande mikro- och makrostruktur. Mångfalden blir därför mycket stor i markskelettets byggnad och därmed också i de mekaniska egenskaperna. En viss koppling mellan jordars inre byggnad och deras mekaniska egenskaper har kunnat göras med intensifierad strukturforskning t.ex. den som bedrivits över lerors mikrostruktur (Pusch 1967, Hansbo 1975). I torrskorpedelen av mark, t.ex. matjord och alv i åkerjord, är strukturbilden ytterligare komplicerad genom den överlagrande makrostrukturen. Den markfysikaliska forskningen som under de senaste årtiondena ägt rum ger här ett bidrag till tolkningen av markmekaniska mät-

värden.

Reaktionen i markskelettet för påverkande krafter är av delvis olika natur i grovkorniga och finkorniga jordarter. I de grovkorniga jordarna är friktionen mellan partiklarna dominerande, i de finkorniga jordarna kohe-sionen. Detta är i sin tur beroende på deformationsgraden av vattenhöljerna på partiklarna. Spänningstillståndet i markskelettet påverkas förutom av yttre krafter också av inre krafter härrörande från ytspänningen i gräns-ytorna fast material - vatten - luft och av hydrodynamiska krafter i markvatten som rör sig (strömkrafter). Varje jordart och varje inre spän-ningstillstånd kommer av de nämnda orsakerna att ge en speciell spännings/deformationskurva. Minskningen i volym hos en provpropp vid påläggning av en last är lika med minskningen i porvolymen hos provet. Minskningen är ett resultat av den relativa rörelsen av enskilda partiklar och en föränd-ring av tjockleken på den adsorberade vattenfilmen i kontaktytorna. För-ändringen i volym hos partiklarna själva är försumbar.

Inom grundläggningstekniken granskar man huvudsakligen vertikala rörelser och det är vanligt att inom geotekniken uttrycka kompressibiliteten hos en jord såsom en relation mellan vertikal spänning och deformation. På grund av att jord i allmänhet inte är ett elastiskt medium uppvisar detta samband en mångfald icke linjära former. Jord undergår således permanenta plastiska deformationer, dvs. när den avlastas återtar den inte sin ursprungliga vol-ym. Med de nämnda förhållandena i beaktande anser man dock att enaxliga kompressionsförsök där provproppen har sidostöd kan ge ett praktiskt mått på kompressibiliteten hos en jord. Man gör det antagandet att över ett be-gränsat tryckintervall är tryck-deformationförhållandet i det närmaste lin-järt (Hansbo 1975).

Spänningar och deformationer i mättad och omättad jord

Spänningar i jorden till följd av t.ex. fordonslast på markytan kan anse bli överförda dels genom direkt kontakt mellan kornen och dels genom por-vatten och eventuell porgas. Den del av totalspänningen, σ , som bärs av kontaktytorna mellan kornen kallas effektivtryck (σ'), och den del som bärs av porvattnet och porgasen kallas portryck (u). $\sigma = \sigma' + u$.

I en vattenmättad jord tas en pålagd last till en början helt upp av vatt-net. Till följd av porvattenövertrycket drivs vattnet ur porerna och den utifrån anbragta spänningen överförs på markskelettet. Under denna tryck-

överföring avtar portrycket och effektivtrycket i markskelettets kontaktytor tilltar i samma mån. Under det att trycket omfördelas, ändrar sig volymen hos provet. Jorden konsolideras. Detta är bakgrunden till den klassiska konsolideringsteorien formulerad av Terzaghi (1925) för mättad jord.

När en jord dräneras ersätts dels vattnet i markrummet med luft dels överföres det vattenavförande trycket via porvattenmeniskerna på markskelettet. Markluften kan vara löst i vattnet, bestå av bubblor i porvattnet eller stå i förbindelse med ytterluften. Totala andelen luft och fördelningen av luften i de nämnda tillstånden ger omättad jord packningsegenskaper som skiljer sig från det mättade tillståndet. För ett omättat system kan följande diskussion föras över sambandet mellan tryckkomponenterna (Bishop 1955).

I ett tänkt snitt genom icke vattenmättad jord antas α andelar av en enhetsyta utgöras av vatten, a andelar av kontaktytor mellan kornen och resten dvs. $1 - a - \alpha$ andelar av gas. Vid jämvikt i jordsnittets enhetsyta gäller

$$\sigma = \sigma' + \alpha u_w + (1 - a - \alpha) u_a$$

där u_a och u_w är de tryck, som uppstår i resp. porluft och porvatten. Kontaktytorna mellan kornen är mycket små och därmed a . Ekvationen förenklas till

$$\sigma = \sigma' + \alpha u_w + (1 - \alpha) u_a$$

eller

$$\sigma' = \sigma - u_a + \alpha(u_a - u_w)$$

α är en empirisk parameter, vars talvärde varierar mellan 0 och 1 beroende av mättnadsgraden. I den omättade zonen bestäms vattentrycket, u_w , av vattnets ytspänning och är till följd därav negativt. Gastrycket, u_a , är beroende på om markluften står i direkt förbindelse med yttre atmosfären eller inte.

Differensen $(u_a - u_w)$, porvattentensionen, lämnar ett positivt bidrag till effektiva spänningen, dvs. man får tillskottskrafter på markskelettet från vattnets ytkrafter. Om jorden inte innehåller luft (mättat tillstånd) så är $u_a = 0$ och $\alpha = 1$. Man erhåller Terzaghis formel $\sigma' = \sigma - u$ som ett

specialfall. Eftersom direkt bestämning av såväl de olika slagen av kontaktytor i en jord som av portrycken inte är genomförbart i rutinmätningar är en direkt tillämpning av den angivna ekvationen för omättat tillstånd ej möjlig. För att få en bild av kraftspelet under kompressionsförloppet är det enklast att mäta volymsförändringar och från dessa makroskopiska mätningar sluta sig till situationen i markskelettet vid olika pålagd dränering/tension. Detta har också varit arbets sättet i denna undersökning.

Packningsförloppet i omättad jord

Till följd av luftinnehållet har omättad jord ett från mättad jord skilt kompressionsförlopp. Olika undersökningar verifierar ett packningsförlopp som åskådliggöres schematiskt i fig. 2.1 (Kinze 1966; Sommer 1975). Förklaringen till packningskurvans förlopp är att återfinna i det förhållandet att den omättade jorden utgör ett trefasssystem, fast material, vatten och luft. Förloppet kan delas in i följande skeden:

- a) I belastningsögonblicket komprimeras eller avgår porluften varvid det uppstår en plötslig sättning.
- b) I det andra skedet sker en långsam avgång av porvatten och en deformation av vattenhöljerna med en tidsberoende sättning som följd. Tidskurvan går mot ett asymptotvärde då jämvikt åter råder i markskelettet.
- c) Vid avlastning sker först en plötslig återgång som dels kan förklaras av expansion av innesluten luft dels av elastiska deformationer i markskelettet.
- d) I det fjärde skedet sker en långsam svällning som utöver ytterligare relaxation i markskelettet kan förklaras av en reorientering av deformerade vattenhöljerna kring jordpartiklarna.

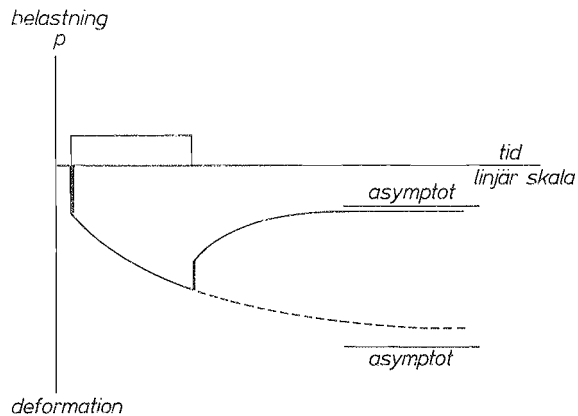


Fig. 2.1. Samband mellan belastning och deformation i omättad jord.

Relationship between applied load and deformation in unsaturated soil.

Det här beskrivna förloppet bekräftas i egna undersökningar refererade i kapitel 4 och 5. Som exempel på tidsförloppet vid kompression i olika trycksteg och relaxation har valts provplatsen Ultuna. Provproppen är från 45 cm nivån i alven, där jordarten är styv lera med mycket god struktur. Vid dränering motsvarande 6 m vp fylls porsystemet till ca 8 % av luft. I diagrammet fig. 2.2 är tiden redovisad i \sqrt{t} -skala, som innebär en stark förkortning av tidsaxeln. Man kan avskilja en snabb initial sättning från en långsamt förlöpande. Den parabelformade kurvan i linjär tidsskala kan i \sqrt{t} -skalan utjämnas till en rät linje i sin första del. Denna linje kan extrapoleras bakåt till 0-tidpunkten och avgränsa den initiala sättningen. Såsom framgår av den följande beskrivningen av metodiken är den "initiala" sättningen dock utdragen till en eller flera sekunder. Tidskurvan har samma principiella förlopp i de olika prövade tryckstegen. Relaxationen har i detta fall endast mätts från slutsteget 800 kPa. Återfjädringen är som synes ganska ringa i förhållande till totala packningen, dvs. deformationen har till huvuddelen varit plastisk.

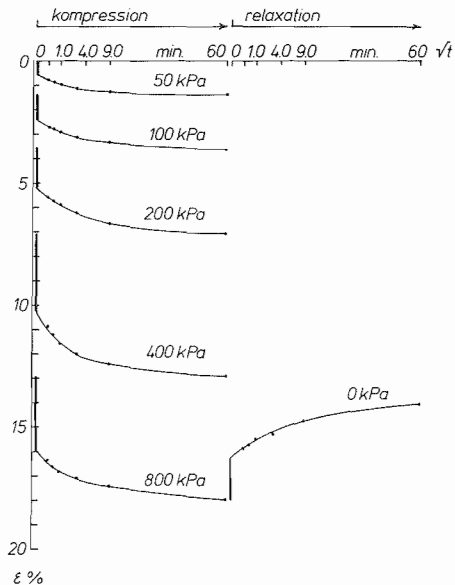


Fig. 2.2. Tidskurvan för statisk last. Ultuna, alv (55 % ler), avsugning 6,0 m vp. Deformationsförloppet under 5 olika laststeg och relaxation efter slutlig last.

Time curve for static load. Ultuna, subsoil (55 % clay), tension 6.0 m water column. Deformation with time for five different load increments and relaxation after final load.

3. METODIK VID MÄTNING AV PACKNINGSBENÄGENHETEN HOS JORD

Allmänt

Vid kompressionsmätning påföres provet ett normaltryck och höjdminskningen, kompressionen, registreras som en funktion av tiden. Inom geotekniken har utformats ett flertal förfaringssätt av kompressionsmätningar på uttagna cylinderprov. Terzaghi (1925) införde ett standardiserat mätförfarande och rutiner för resultatuttolkning. Metoden avsåg finkorniga jordar i vattenmättat tillstånd. Apparaten kallades ödometer av ett grekiskt ord med betydelsen "svälla". Provet placerades mellan porösa keramiska plattor så att man fick en avgång av vatten ut ur provet vid belastningen. Det standardiserade förfarandet innebär att belastningen påförs stegvis och att lastökningen i varje steg är lika med den tidigare påförda lasten. Varje laststeg får verka under ett dygn, s.k. dygnsförsök. Alternativt kan dock ödometerförsök utföras som s.k. snabbförsök. Principen för dessa försök är att lasten ökas när primärkonsolideringen avslutats, vilket är liktydigt med att portrycket gått ned till 0. Lasttiden kan då begränsas till 1 timme eller mindre.

Den enklaste och mest använda ödometern har en fast ring med dränering från båda ändar. Belastning läggs via en tryckplatta på provets övre ända. Genom att provet under provningens gång deformeras elastiskt och plastiskt i horisontell led byggs sidokrafter upp mot stödringen. Om det är friktion mellan provet och stödringen orsakas därigenom en ojämn tryckfördelning i provproppen. Det är därför av vikt att minimera inflytandet av denna friktion bl.a. genom att välja en liten höjd på provet i förhållande till diametern. Vidare bör stödringens yta vara polerad och belagd med t.ex. silikonfett för att nedbringa friktionen. I en ödometer med dubbelsidig intryckning kan båda tryckplattorna röra sig in i stödringen som då sägs vara flytande. Därigenom kan provets höjd fördubblas utan att influensen av glidfriktionen mot mantelytorna blir störande. En granskning och sammanställning av olika felkällor vid kompressionsmätningar har gjorts av bl.a. Kezdi (1973). Det är enligt alternativet med flytande ring som utrustningen vid avdelningen för hydroteknik utformats. Av olika möjliga benämningar på anläggningen har valts kompressometer. Det är dels ett självförklarande namn dels överensstämmer det med geoteknikernas benämning på utrustning för provning av packningsbenägenheten på torra eller naturfuktiga jordarter med friktionskaraktär.

De mekaniska egenskaperna i matjord och alv av torrskorpan är i flera hänseenden väsentligt skilda från djupare marklagers egenskaper. I markens djupa-

re lager är det fråga om markens hållfasthet i främst mättat tillstånd, medan i torrskorpan egenskaperna vid varierande mätnadstillstånd eller dräneringsgrad är av intresse. I torrskorpan finns också en makrostruktur som ger en variation i porvolym mellan provproppar från samma marklager av normalt ± 2 %. På grund av de speciella egenskaperna i de ytliga lagren av marken kan resultatolkningen inte helt parallelliseras med den geotekniska. De data över torrskorpans mekaniska egenskaper som tas fram i denna undersökning utgör en kompletterande del till de allmänna markfysikaliska data över markprofiler som tagits fram vid avdelningen för hydroteknik, Institutionen för markvetenskap (Andersson m.fl. 1947-1980). Den parallella granskningen av de markmekaniska och markfysikaliska egenskaperna syftar till att belysa hur markrummet och rotmiljön förändras när markskelettet påverkas av yttre krafter, att ävenså belysa möjligheten att med erhållna värden på packningsbenägenheten beräkna graden av deformation i markrummet på olika djup i en profil.

Vid utformningen av utrustningen vägdes bl.a. följande krav mot varandra.

- a) Den skulle vara anpassad till institutionens system för provtagning och markfysikaliska analyser. Detta innebar möjligheter att mäta och ha under kontroll faktorer som t.ex. tension, vattenhalt, porstorleksfördelning och även deras förändring i samband med belastningsproven.
- b) Den skulle vara anpassad till prover med de makrostrukturdrag som förekommer i matjord och alv.
- c) Den skulle ha en utformning som medgav en långt driven rationalisering av mätarbetet, och därigenom en kapacitet som tillfredsställde de statistiska kraven på upprepningar.
- d) Den skulle i möjligaste mån belasta jordproverna kongruent till vad som sker i fält. Förutom statisk belastning skulle även pulserande dynamiska belastningsprov kunna möjliggöras.

Enligt dessa krav utformade Lave Persson vid institutionen kompressometrar för dels statiska belastningsprov dels pulserande dynamiska belastningsprov. Som kraftkälla valdes tryckluft. Detaljerad beskrivning av "Tryckluftssödometer för statiska belastningsprov" (Lave Persson 1979) finns att tillgå vid institutionen för markvetenskap. Pneumatiken gjorde det möjligt att forma mätprocessen rationellt såsom framgår av följande översiktliga beskrivning av kompressometeranläggningen och dess handhavande. Pneumatiska cylindrar ger bl.a. en enklare reglerteknik och större noggrannhet än hydrauliska cylindrar. Utrustningen kunde byggas av färdiga komponenter vilka visade sig vara driftsäkra och billiga. Pneumatiken visade sig också lämplig för avancerad reglering vid dynamiska studier, där belastningen skall simulera ett hjul som rullar över marken/provproppen upprepade gånger.

Kompressometeranläggning för statisk belastning

Anläggningen består av följande huvuddelar (fig. 3.1 a och b): Provcylindrar, stativ med tryckpressar och manöverdon, tryckregleringscentral, mätdon för avläsning av deformationen.

Provcylindrar. Utrustningen utformades för provcylindrar med en innerdiameter av 72 mm, dvs. den standarddiameter som provcylindrar med höjden 50 och 100 mm i den markfysikaliska rutinanalysen vid institutionen har. Provcylindrarnas höjd bestämdes i detta fall till 25 mm. Provets diameter är således 2,9 ggr höjden. Enligt olika studier kan en relation mellan diameter och höjd av 2,5 eller däröver vara godtagbar (Kezdi 1969, Janbu 1970, Wilun och Starzewski 1972, Koolen 1974). För att ytterligare minska inflytandet av friktionen i mantelytan utformades utrustningen för kompressometerprov med dubbelsidig intryckning.

I 25 mm cylindrarna är standardrörets godstjocklek om 2 mm bibehållen. Med denna väggstjocklek är, enligt utförda kontroller, cylinderns elastiska utvidgning vid lastpåföring försumbar. På 50 och 100 mm standardcylindrar för fysikalisk analys är väggarna nedsvarvade till 1,5 mm med en valk kvar vid den väsade eggen för att minska friktionen mot cylinderns utsida vid nedslagningen så att ostörda prover av hög kvalitet kan erhållas. 25 mm höga cylindrar ger enligt okulär granskning även utan denna väggutformning väl reproducerbara prover.

Stativ med tryckpressar och manöverdon. Tryckpressarna är sammanförda i grupper om 5 enheter. Ett batteri med fem pressar är 1200 mm långt, 220 mm brett och 530 mm högt. Det väger ungefär 80 kg med cylindrar och manöverdon och kan flyttas och ställas upp på en vanlig laboratoriebänk utan fastsättningsanordningar eller andra speciella åtgärder. Vid institutionen har byggts två batterier med totalt 10 tryckpressar.

Cylindrarna med tryckluftskolvar är av fabrikat Mecman typ 1100V/100. Det är dubbelverkande cylindrar för lätt drift, dvs. maximalt 1 MPa lufttryck. Kolven har en fastvulkad läppformig kolvtätning av gummi med låg glidfriktion och litet igångsättningsmotstånd. Kolvstången är gängad i sin yttre ände för direkt montering av tryckplattor av olika slag. Slaglängden är 100 mm, kolvarean $80,1 \text{ cm}^2$ på trycksidan och $72,1 \text{ cm}^2$ på dragsidan. Om båda kolvkamrarna förses med luft av samma tryck, är den aktiva kolvarean $8,0 \text{ cm}^2$ och kraften således en tiondel av den normala. Detta utnyttjas vid långsam körning, när tryckplattan skall läggas ner på provet utan att någon

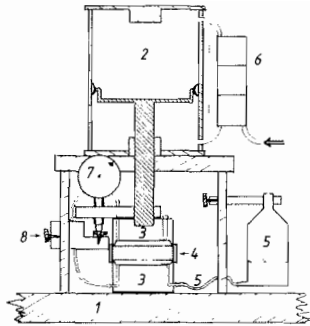


Fig. 3.1 a. Kompressometer för statisk belastning. Utförande med dränerande tryckplattor.

1. Stativ med flänsfäste och dragstänger
2. Dubbelverkande pneumatisk cylinder med kolv och kolvstång
3. Övre och undre tryckplatta (dränerande)
4. Provcylinder med jordprov
5. Dränering med uppsamlingsflaska
6. Manöverdon
7. Indikatorklocka för mätning av deformation
8. Fäste för d:o med nollställningsjustering

Compressometer for static loading, here using draining pressure plates.

1. Frame
2. Two-way pneumatic cylinder with piston and piston-rod
3. Upper and lower pressure plate (draining)
4. Cylinder with soil sample
5. Drainage with collecting bottle
6. On/off valves
7. Meter for measuring deformation
8. Attachment for meter and zero adjustment

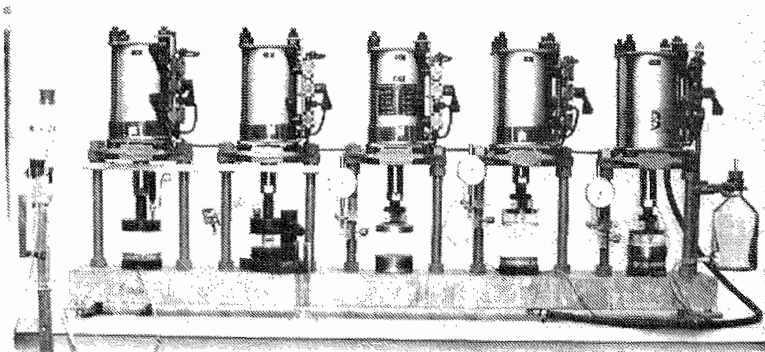


Fig. 3.1 b. Kompressometeranläggning med 5 enheter. På bilden utrustade med prövade alternativa former på tryckplatta anpassade för olika mätuppgifter.

Compressometer with 5 units, fitted here with tested alternative types of pressure plate suited for different measurements.

belastning läggs på. Alla tryckaktiveringar och rörelser hos kolven sker pneumatiskt. Varje cylinder är utrustad med tre manuellt styrda ventiler. Manöverdonen är treportsventiler med stabila lägen. Två av dem aktiverar eller avluftar var sin cylinderkammare. Den tredje fungerar som avstängning av tilluftledningen och har därför sin avloppsport igensatt. Pressarna arbetar statistiskt med obetydlig luftförbrukning under drift.

Tryckregleringscentral. Varje grupp om fem tryckpressar har en gemensam matarledning med slang och snabbkoppling, som anslutes till en tryckregleringscentral. Den inkommande luften, från en separat eller central kompresoransläggning, renas i ett filter där partiklar och kondensvatten avskiljs. Efter filtret följer en backventil, som gör att tillfälliga avbrott i luftförsörjningen under en mätning inte påverkar pressarnas funktion.

I tryckregleringscentralen är regler- och mätdonen uppdelade i två grupper, som betjänar fem tryckpressar vardera. Därigenom är det möjligt att köra med två olika tryck samtidigt. Vidare föres cylindrar med lika friktionsegenskaper samman så att man för varje grupp får ett tolerabelt tryckförlustintervall. Till varje grupp hör två tryckregulatorer, två tryckmätare, en omkopplingsventil, en backventil och självstängande snabbkoppling för anslutning av tryckpressarna. Tryckregulatorerna är konstruerade vid institutionen av Lave Persson. De är modifierade dubbelverkande precisionsinstrument av membrantyp. Kraften från en stålfjäder balanseras mot det inställda trycket, sekundärtrycket, via ett gummimembran. Tryckets storlek ställs in steglöst genom att stålfjädern spänns manuellt med en gängad ratt. Vid för lågt tryck öppnas en ventil, som släpper in luft från tryckluftsnätet. Vid för högt tryck frilägges ett avluftningshål genom membranets rörelser, så att trycket korrigeras. På sekundärsidan har regulatorerna också ett ständigt öppet avluftningshål med 0,4 mm diameter, som förhindrar att dynamiska tryckstötter uppkommer. Rent praktiskt innebär detta, att trycket inte "kryper" när flödet ändrar storlek eller upphör. Den konstanta sekundärluftningen tillsammans med stort membran ger regulatorn stor precision. Två regulatorer betjänar varje grupp pressar, varav en arbetar från 0-60 kPa och en från 0-600 kPa. Tryckmätarna, en för varje regulator, har samma arbetsområden. Noggrannheten är klass 0,6, dvs. 0,6 % av fullt skalutslag eller uttryckt i absoluta mått 0,36 respektive 3,6 kPa. Begränsande är dock mätarnas skaldelning, som är 0,5 respektive 5 kPa. Detta betyder, att belastningen på provet kan ställas in med en noggrannhet av ca 1,0 kPa upp till 120 kPa och ca 10 kPa upp till 1,2 MPa under förutsättning att provcylindrar med 72 mm diameter användes.

Tryckplattor och mätdon för avläsning av deformationen. Pressarna är försedda med tryckplattor för överföring av kraften från kolven till provet. En övre tryckplatta är monterad i kolvstången, en undre står lös på stativbalken. Övre tryckplattan skruvas på den gängade kolvstångsändan och är stumt förbunden med denna. Den undre kan föras i sidled på underlaget. Denna uppstyning av plattorna är egentligen inte önskvärd vid ett belastningsprov, men är till fördel på heterogena prover med ojämn sättning och risk för kantring av tryckplattan. Tryckplattor för jord är dels i plast med infälld dränerande keramisk skiva för normala prover, dels massiva av stål eller plast för steniga prover. Samtliga har en diameter av 71 mm, dvs. 1 mm mindre än i standardcylindern. Detta ger ett spelrum av 0,5 mm mellan cylinderväggen och tryckplattan. Spalten har provats fram som den lämpligaste för undvikande av friktion, fastkilning och att jordmaterial kryper ut. Vatten kan dock läcka ut den vägen om sådant frigörs vid belastningen.

För att kunna avläsa provets deformation används indikatorklockor, en för varje press, fastmonterad på en arm, som utgår från kolvstångsändan (fig. 3.1a). Indikatorklockan är ett instrument för längdmätning med en noggrannhet av 0,01 mm. Visaren går ett varv för varje intryckt hel mm. En mindre visare indikerar antal hela mm från 0 till 10, vilket är instrumentets hela arbetsområde. För att få ett fast nollläge har mätanordningen försetts med ett höj- och sänkbart anslag fastspänt med en ratt på ena stativpelaren. Med denna anordning kan tryckplattan läggas ner löst på provet och mätdonet nollställas på $\pm 0,005$ mm när utan att tryckplattan rubbas.

Kalibrering av anläggningen. Kalibrering av anläggningen utfördes med stålfjädrar med kända karakteristika. För att täcka tryckpressarnas hela inställningsområde användes fyra olika fjädrar med definierade tryckintervall. Fjädrarna läggs in i pressgapet. De mäter den resulterande kraften. Friktionen mellan kolv och cylinder respektive mellan kolvstång och dess styrbussning och tätningringar minskar den av lufttrycket i kolven nedåtriktade kraften. Tyngden av kolv, kolvstång, tryckplatta och indikatorklocka med fästnanordningar adderas till den nedåtriktade kraften. För varje önskad belastning på provet bestämmer man behövt lufttryck i kolven, Friktionen i kolvarna ger en viss variation, men det har visat sig möjligt att sortera kolvarna i ett snävt intervall i grupper om fem. Institutionens anläggning omfattar som nämnts två sådana grupper. För vardera gruppen räknas med ledning av kalibreringsmätningen fram medelvärdet på lufttryck som operatören har att följa. Med kalibreringen kringgår man således influenserna av frik-

tion och tyngd i kolven samt även mätinstrumentens felvisning.

Mätproceduren vid kompressometerprov. Cylinder med jordprov ställs på den nedre tryckplattan och passas in under den övre tryckplattan. Det första lufttrycket ställs in på regleringscentralen efter kalibreringstabellen. Den övre tryckplattan förs långsamt ned till någon mm ovanför provet. Efter finjustering läggs tryckplattan ner på provets yta. Mätklockans anslag hissas upp till ett läge där klockans visare står i nolläge.

Första laststeget är som regel ett förkonsolideringssteg. Det har bl.a. till uppgift att korrigera alla små ojämnheter på propptytan, som är oundvikliga på strukturerade prover. Belastningen skall då vara hälften så stor som vid det första laststeget, där mätningar skall ske. Tiden skall vara lika lång som vid varje efterföljande steg, vanligen en timme eller ett dygn. Däremot nollställs inte indikatorklockorna förrän efter förkonsolidering.

Vanligen fördubblas belastningen i varje steg. Inför höjningen stängs lufttillförseln till cylindrarna. Nästa tryck ställs in vid regleringscentralen. Därefter startas pressarna en och en efter ett tidsschema och initialförloppen registreras individuellt under 1 minut innan nästa press startas.

Med relaxation avses återgången i deformation när ett prov avlastas. I denna utrustning avlägsnas trycket på kolven och därmed på provet. Provets svällning följs på indikatorklockan. Ett relaxationssteg skall följas lika lång tid som ett belastningssteg. I denna undersökning har relaxationen rutinmässigt mätts endast efter sista laststeget. I särskilda studier har dock samtliga laststeg relaxerats. Ett jordprov deformeras något annorlunda om trycket lastas av mellan stegen. Man bör vidare märka att noggrannheten är mindre vid relaxationsmätningar efter låga belastningar beroende på att tyngden av de rörliga delarna och glidfriktionen i den pneumatiska cylindern inte kan lastas av. Vid laster över 100 kPa kan denna influens betraktas som försumbar.

Belastnings- och tidsschema. Inom denna undersökning har rutinmässigt följande belastnings- och tidsschema följts. En initial last av 12,5 kPa läggs på (förkonsolidering). Vid varje lastökning fördubblas normaltrycket i stegen 25, 50, 100, 200, 400 och 800 kPa. Avläsning av deformationen sker efter ett i förväg uppgjort schema där hänsyn tagits till att operatören hinner läsa av ett värde var 15:e sekund med godtagbar noggrannhet och att alla tio pre

sarna är igång samtidigt. Pressarna i en grupp startas med 90 sekunders mellanrum och följes individuellt under den första minuten. En avläsning efter 2 minuter 45 sekunder klaras av mellan andra och tredje pressens start. Sedan fem pressar satts igång läses samtliga av efter 9 minuters belastning. De udda tiderna beror på att två avläsningar inte får ligga närmare varandra än 15 sekunder. Starten och registreringen av initialförloppen av en kompressometergrupp tar 15 minuter. Sedan kan operatören förbereda och starta den andra gruppen, innan det är dags för 60-minuters-avläsningen på den första pressen. Tidsschemat har av ovan angivna skäl innefattat följande tider: 15, 30, 60 s, 2 min 45 s, 9 min, 60 min. Det finns också utrymme för pauser i arbetet nu. Vid 24-timmarsbelastningar görs sedan avläsningar efter 3, 6 och 24 timmar. Det är inte meningsfullt att läsa av med kortare intervall under ett dygns långt provs slutskede. Med detta tidsschema hinner en operatör göra tester med de nämnda sju laststegen på tio prover under en arbetsdag, förutsatt att varje laststeg begränsas till en timme. Det beskrivna förfarandet innebär en väsentlig rationalisering av mätarbetet. Mätningen visar sig säker med få operatörsfel. Kostnaden per prov blir låg. Metodutvecklingen enligt de beskrivna riktlinjerna har på så sätt givit en möjlighet till studier av markens packningsbenägenhet av stort omfång.

Bearbetning av kompressionsdata. I avläsningsprotokollet redovisas primärhöjden (h) på provet och höjdminskning, Δh , med tiden i de olika laststegen. Ur mätdata beräknas i första hand den relativa kompressionen, \mathcal{E} , enl. $\mathcal{E} = 100 \frac{\Delta h}{h}$. I markpackningssammanhang är också förändringen i portal (e) och porositet (n) av intresse. Portalen (e) utgör kvoten mellan porvolym och fasta substansens volym; porositeten (n) utgör kvoten mellan porvolym och provets totala volym. Underlaget till dessa beräkningar är provens kompaktdensitet, ρ_s , och torrdensitet, ρ_d . Mellan n och e råder sambanden

$$e = \frac{n}{1 - n} \quad \text{eller} \quad n = \frac{e}{1 + e}$$

Mellan relativ kompression (\mathcal{E}), portal (e) och porositet (n) kan följande samband deduceras.

För ett begynnelseportal, e_0 , och en relativ kompression, \mathcal{E} , erhålles ett slutportal, e , enl. formeln

$$e = e_0 - \mathcal{E}(1 + e_0)$$

Motsvarande erhålles för en begynnelseporositet, n_0 , och en relativ kompression, ε , en slutporositet, n , enl. formeln

$$n = n_0 - \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} (100 - n_0)$$

Inom denna undersökning har formats ett dataprogram för behandling av observerade mekaniska och fysikaliska data enl. dessa formler. I den fortsatta bearbetningen har i första hand porositeten använts med anledning av att den i markstudier i övrigt inom jordbruket är mest frekvent. Portalet har dock uppenbara fördelar vid redovisning av porstorleksfördelningar.

Kompressometeranläggning för dynamisk, pulserande last

Anläggningen för dynamisk, pulserande last (fig. 3.2) har också den byggts vid Avdelningen för hydroteknik under ledning av Lave Persson. Anläggningen är utformad för mätning av endast ett prov i taget och således ingår endast en pneumatisk tryckkolv (fig. 3.2, pos. 24-26). Kolven är av typ MecMan med anslutningar som tillåter stora luftflöden för att säkerställa god följsamhet i styrningen. Styr- och registreringsutrustningen är omfattande (fig. 3.2, pos. 1-23). Servoluftrycket för styrutrustningen är 600 kPa. Deformationen av provproppen registreras med två mätare, en för minimum- och en för maximumtryckningen. Skillnaden visar den elastiska återfjädringen, relaxationen. Puls längden går att variera från 0,2 s till 2 s, pulsintervallet från 2 s till 30 s. Tryckstegen kan liksom vid statisk belastning varieras från 25 till 800 kPa. I denna undersökning har högsta trycket begränsats till 400 kPa för att undvika den starka slitningen på utrustningen vid 800 kPa. Antalet pulser registreras i ett räkneverk med ljud- och ljussignal. Avläsning av deformationen har skett upp till 1000 pulser, enl. följande schema: 0, 5, 10, 20, 30, 100, 200, 300, 500 och 1000 pulser. Enligt särskild studie med snabbskrivare konstaterades att den valda pulslasten var fullt utbildad efter 0,05 s. 90 % av fullt värde nås nästan momentant såsom fig. 3.3a visar. Även avlastningen sker till huvuddelen momentant med en släpning i sista delen under uppbromsningen. Anläggningen ger alltså en distinkt och väl avgränsad lasttid.

För jämförelse anges i fig. 3.3 b spänningskurvor under hjullaster. I en punkt i marken varöver ett hjul rullar fram byggs spänningen successivt upp till ett maximum för att sedan åter avta. Man får en kurva som blir mer utdragen ju långsammare hjulet rullar fram. Det kan visas (Kinze 1966)

att packningseffekten i jorden är proportionell mot ytan under tidskurvan. Den s.k. konsolideringskonstanten, F , är ett mått på denna yta. F är proportionell mot lastytans längd och lastens storlek och omvänt proportionell mot hjulets framföringshastighet.

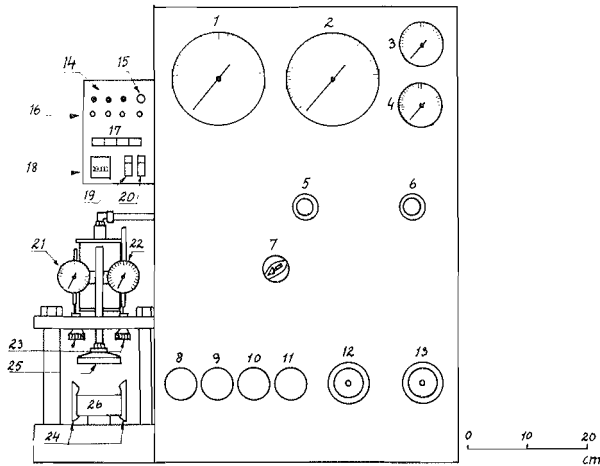


Fig. 3.2. Kompressometeranläggning för dynamisk, pulserande last.

- 1, 2 Tryckmätare för arbetstryck, 0-100 kPa, 0-1000 kPa
- 3, 4 " " nät och servotryck
- 5, 6 Regulator för arbetstryck och servotryck
- 7-11 Manöverorgan för manuell och automatisk tryckning
- 12-13 Tidsinställning, intervall och pulslängd
- 14-20 Räkneverk med ljud- och ljussignal
- 21-23 Indikatorer för min- och max-deformation med nollställningsanordning
- 24-26 Tryckkolv. Fast och rörlig tryckplatta med säkerhetsspärrar

Compressometer for dynamic, pulsation loading.

- 1, 2 Pressure meter for working pressure, 0-100 kPa, 0-1000 kPa
- 3, 4 Pressure meter for mains and servo-pressure
- 5, 6 Regulator for working pressure and servo-pressure
- 7-11 Controls for manual and automatic appl of pressure
- 12-13 Timer, interval and pulse duration
- 14-20 Counter with audible and visible signals
- 21-23 Indicator for min. and max. deformation with zero adjustment devices
- 24-26 Pneumatic pressure cylinder. Stationary and movable pressure plate with safety devices.

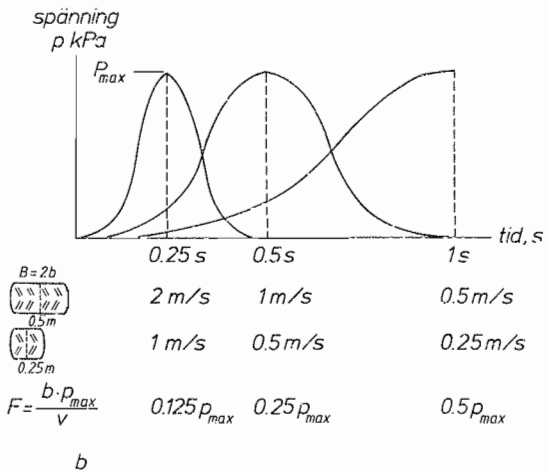
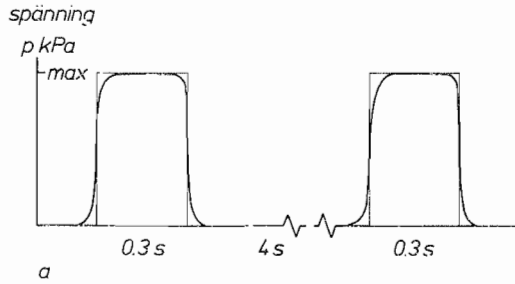


Fig. 3.3 a) Spänningsvariationen i kompressometeranläggning för dynamisk, pulserande last.

b) Exempel på spänningskurvor under hjullaster. Inverkanstid för olika framförelshastigheter vid två antagna fall av hjulutrustning och därmed längd av belastningsytor. F är den s.k. konsolideringskonstanten.

Variation in pressure in the compressometer for dynamic, pulsating load.

Example of pressure curves under wheel loads. Times of influence for different forward speeds in two assumed cases of wheel equipment and thus length of loaded areas. F = consolidation constant.

De påkänningar som förekommer i fält under rörliga ytlaster har en komplicerad karaktär, som det inte är möjligt att helt efterlikna i mätanordningar såsom de beskrivna. Packningsförloppet vid en hjulöverfart kan närmast jämföras med vad som sker i en anläggning för dynamisk, pulserande last och det vore önskvärt att mätningar genomgående kunde utföras i den formen. En sådan anläggning är emellertid som tidigare framgått komplicerad i konstruktion och handhavande. Rationalisering av mättningsarbetet i flera enheter kan ske enklast i en anläggning för statisk last. Tidsåtgången per prov vid statisk last är som i det föregående visats mera rimlig och det blir kostnadsmässigt möjligt att genomföra det stora antal upprepningar som vid studier i torrskorpan är påkallat med hänsyn till variationen mellan prov från samma lager. Jämförande studier av packningsförloppen vid de två lastslagen är angelägna för att belysa i vad mån metoden med statisk last ger en tillämplig bild av markförändringen in situ. Mätningar av deformationen för dynamisk, pulserande last har i första hand haft till syfte att få fram data för en sådan jämförelse.

Studier av packningsförloppet för dynamisk, pulserande last och statisk last utfördes på prover från 3 profiler: Ultuna, matjord, plogsula, alv; Grävsta, alv och Sätuna, alv. I rutinanalyserna har pulslängden varit 0,3 s och intervall 4,0 s. Den valda pulslängden 0,3 s har sin motsvarighet i exempelvis ett fordon som framföres med en hastighet av 3,6 km/tim på däck som ger 30 cm lång anliggningsyta. De dynamiska belastningsproven utfördes vid 3 olika dräneringsgrader, 0,05 m, 1,0 m och 6,0 m vattenpelare. Vid hög vattenmättnad, 0,05 m vp, påverkades provet i cylindern starkt av den pulserande lasten. Redan vid 100 kPa hade provet tendens att flyta sönder och pressas ut mellan kolv och cylindervägg. Vid 0,05 m vp fick mätningen därför avbrytas vid 200 kPa på grund av massförlust. Vid 1,0 m vp förelåg också en tendens till flytning men packningsförloppet kunde i allmänhet följas till 400 kPa. Vid 6,0 m vp fanns ingen tendens till flytning och packningsförloppet kunde utan komplikationer följas till 400 kPa. För en ostörd studie av åkerjordar över hela registret av dynamiska påkänningar krävs alltså en dränering som tömmer por-systemet på lätt rörligt vatten.

Redovisning av enskilda lokaler

Ultuna, Uppsala län

Provplatsen ingår i serien av profilstudier med statisk belastning (kap. 5 sid. 48). Proverna togs i detta fall ut på nivåerna, 12-14,5 cm = matjord

(45 % ler), 25-27,5 cm = plogsula (60 % ler) och 45-47,5 cm = alv (48 % ler). I varje nivå togs 9 parallellprov. Dessa fördelades med 3 prov i vardera av de tre avsugningsstegen 0,05 m, 1,0 m och 6,0 m vp.

Mätningen av deformationen i kompressometern för dynamisk, pulserande last utfördes enl. standardrutinen med 0,3 s pulslängd och 4 s pulsintervall. Med kännedom om pulslängd och pulsantal kan en effektiv lasttid beräknas. Packningsförloppet har i allmänhet följts under 1000 pulser vilket innebär en effektiv lasttid av 300 s eller 5 min. Den effektiva lasttiden vid dynamisk, pulserande last har i det följande använts för att i tidsdiagram jämföra förloppen i statisk och dynamisk packning. Vid långa belastningstider om 1 tim. eller 24 tim. redovisas resultaten med tiden antingen i log-skala eller kombinerad \sqrt{t} , log-skala (Brinch-Hansen 1961). Med dessa tidsskalor erhåller man dels en möjlighet till överblick av tidsperioden dels oftast rätlinjiga samband. Vid redovisning av packningsförloppet under det första skedet kan dock en linjär skala vara mer upplysande genom att man erhåller en direkt bild av det fysikaliska skeendet. I fig. 4.1 redovisas i linjär skala som exempel de primärt erhållna värdena av deformationen för en enskild propp vid 6,0 m vp. I diagrammet anges deformationen i % av provhöjden, ε %. Den första säkra avläsningen av deformationen såväl max. som min. kunde göras efter 30 pulser eller 9 s effektiv lasttid. Redan här var återfjädringen eller relaxationen fullt utbiidad dvs. nått ett nära konstant värde. I de prövade laststegen sker också huvuddelen av deformationen inom 9 s, varefter den successivt avtar. Med ökad last erhålles en ökad relaxation.

I fig. 4.2 redovisas i ett tidsdiagram med linjär skala packningsförloppet vid dels dynamisk dels statisk last på parallellprover från Ultuna, alv. Vattenhalten i propparna har reglerats genom avsugning till 6,0 m vp. Vid statisk last görs första avläsningen rutinmässigt efter 15 s, vid dynamisk last rutinmässigt efter 30 pulser eller 9 s effektiv lasttid som tidigare påpekats. För båda lastslagen erhålles inom dessa tidsrymder en relativt stor, initial sättning. Vid dynamisk last är sättningen därefter större än för statisk last under motsvarande lasttid. Den pulserande spänningen är uppenbarligen aggressivare i markskelettet med en större deformation än den statiska under den prövade perioden.

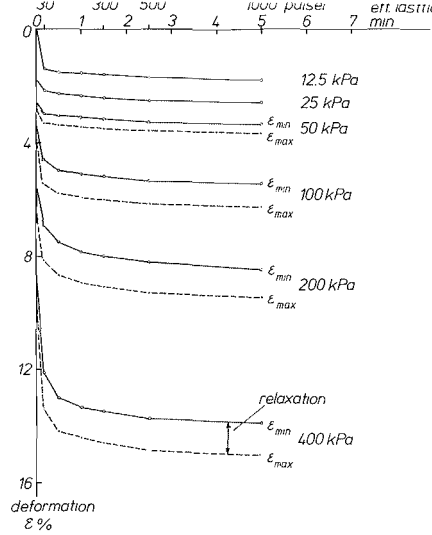


Fig. 4.1. Tidskurvan för dynamisk, pulserande last. Ultuna, alv 45-47,5 cm, avsugning 6,0 m vp. Maximum (ϵ_{max}) och minimum (ϵ_{min}) deformationen med tiden för 6 olika laststeg.

Time curve for a dynamic, pulsating load. Ultuna, subsoil 45-47.5 cm, tension 6.0 m water column. Maximum (ϵ_{max}) and minimum (ϵ_{min}) deformation with time for 6 different load increments.

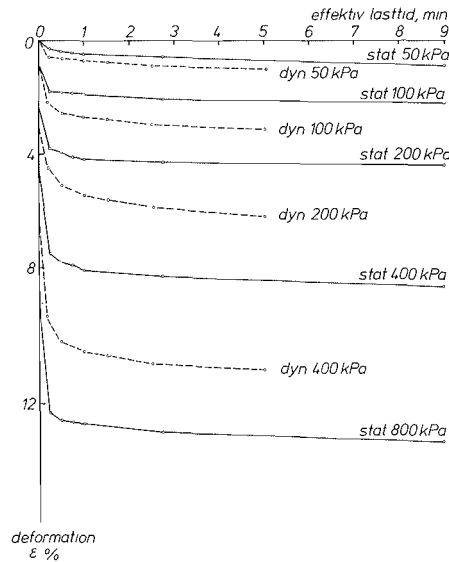


Fig. 4.2. Ultuna, alv 45-47,5 cm, avsugning 6,0 m vp. Jämförelse av tidskurvans form vid statisk och dynamisk, pulserande last.

Ultuna, subsoil 45-47.5 cm, tension 6.0 m water column. Comparison of the form of the time curves for static and dynamic, pulsating loads.

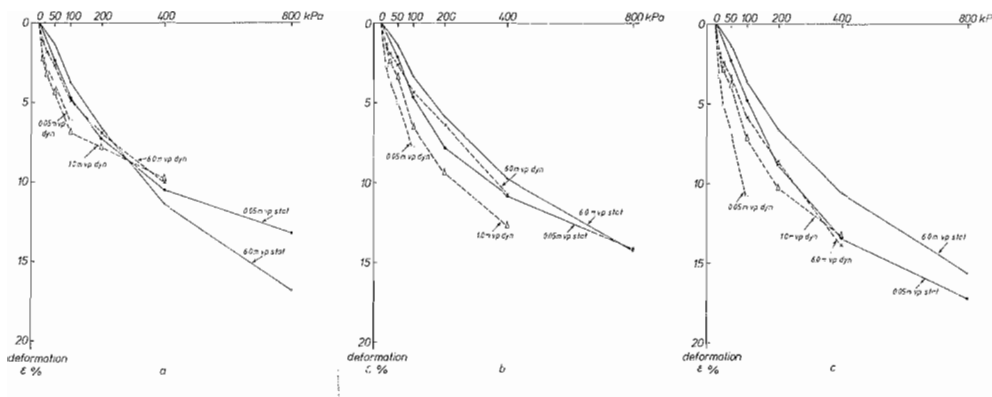


Fig. 4.3. Ultuna, a) matjord, b) plogsula, c) alv. Jämförelse av packningskurvorna under statisk och dynamisk, pulserande last vid avsugningar i intervallet 0,05 m vp till 6,0 m vp.

Ultuna, a) topsoil, b) plough pan, c) subsoil.

Comparison of compaction curves under static and dynamic, pulsating loads with tension in the range from 0.05 m to 6.0 m water column.

I fig. 4.3 a, b och c redovisas sättningsförloppet som funktion av pålagd last för Ultuna, matjord, plogsula och alv. Vid dynamisk, pulserande last i 3 avsugningssteg: 0,05, 1,0 och 6,0 m vp; vid statisk last i 2 avsugningssteg: 0,05 och 6 m vp. Det är att märka att kurvorna för dynamisk last är baserade på sättningen efter 1000 lastpulser eller 5 min effektiv lasttid. Kurvorna för statisk last är baserade på sättningen efter 60 min lasttid. Sättningen vid 0,05 m vp har kunnat följas endast till 100 kPa på grund av den inledningsvis nämnda flyttendensen hos provproppen. Rörelsen hos porvattnet vid pulserna påverkar som förut nämnts markskelettet mycket starkt. Trots den kortare lasttiden är den totala deformationen därför större vid dynamiska än vid statiska laster särskilt vid hög vattenmättnad såsom vid 0,05 m vp och 1,0 m vp. Vid 6,0 m vp ligger packningskurvorna för de två lasttyperna närmare varandra och löper delvis parallellt. Vid dränering till 6 m vp töms uppenbarligen porsystemet på vatten, som kan komma i rörelse vid de prövade dynamiska lasterna intill 400 kPa. Rörelsemöjligheterna för kvarvarande vatten begränsas också successivt när det grova porsystemet destrueras. Packningskurvorna för statisk belastning företer likartat förlopp i samtliga 3 nivåer. Således är sättningen större vid 0,05 m vp än vid 6,0 m vp i inledningsskedet och fram till trycksteget 200 kPa. Därefter går sättningen snabbare vid 6,0 m vp så att skillnaden utjämnas eller till och med som i matjorden sättningen vid 6,0 m vp blir större. Packningskurvorna

vid dynamisk last synes följa samma mönster med en utjämning vid 400 kPa. De erhållna resultaten i denna jämförande studie pekar på viss överensstämmelse i packningsresultat av de två lastlagen när dräneringsgraden når 6,0 m vp. Packningsresultatet för statisk last som verkar under en längre tidrymd bör således vara en god skattning av den packning som sker i fält under rörliga ytlaster av olika frekvens med kort verkanstid.

Grävsta, Uppsala län

Provplatsen ingår i serien för profilstudier med statisk belastning. Prover togs i detta fall endast i alven i lager 40-50 cm (lerhalt 30 %) med 9 parallellprover fördelade på avsugningsstegen 0,05 m, 1,0 m och 6,0 m vp. Mätningen utfördes enligt standardrutinen. Redovisning av resultaten begränsas här till sambandet i de prövade försöksleden mellan påförd last och procentuell deformation (fig. 4.4).

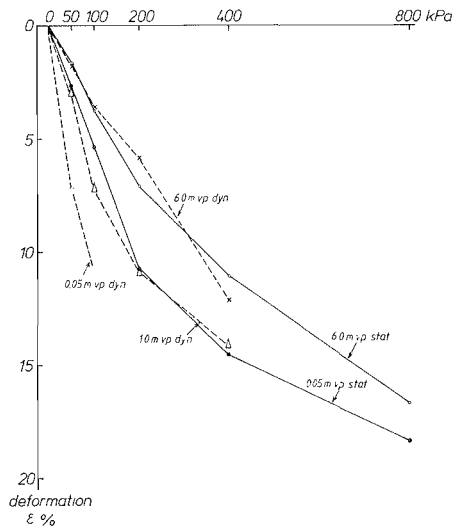


Fig. 4.4. Grävsta, alv.

Jämförelse av packningskurvorna under statisk och dynamisk, pulserande last vid avsugningar i intervallet 0,05 m vp och 6,0 m vp.

Grävsta, subsoil.

Comparison of compaction curves under static and dynamic, pulsating loads with tension in the range 0.05 m to 6.0 m water column.

Packningskurvorna för statisk last uppvisar den typiska bilden med en inledningsvis större deformation i den mättade (0,05 m vp) jorden. Vid 6,0 m vp dränering är markskelettet stelare och deformeras i mindre grad än vid 0,05 m vp. Vid ett pålagt tryck av 800 kPa närmar sig dock kurvorna varandra. Den totala deformationen är i båda fallen stor på grund av hög andel grova porer i Grävstajorden. Packningskurvorna vid dynamisk last har för de olika dräneringsgraderna samma principiella förlopp som de statiska. För 0,05 m vp och dynamisk last erhålles på denna jordtyp med 30 % lera (mellanjordart) avsevärd deformation redan intill 100 kPa. Man kunde iakttaga att provet desintegrerades kraftigt av det pulserande porvattnet och materialet flöt ut mellan cylinder och kolv. Även vid 1,0 m vp påverkades markskelettet starkt av porvattenpulsens. Mätningen kunde dock fullföljas till 400 kPa. Vid 6,0 m vp är porsystemet till huvuddelen frilagt från vatten som kan komma i rörelse vid dynamisk last. Markskelettet har blivit stelt. Packningskurvorna för de två lastslagen, statisk och dynamisk, är av dessa anledningar mera sammanfallande vid 6,0 m vp.

Sätuna, Uppsala län

Provplatsen ingår i serien för profilstudier med statisk belastning (kap. 5 sid. 46). Prover togs i alven, lager 40-42,5 cm, lerhalt 42 %. Även här mät-

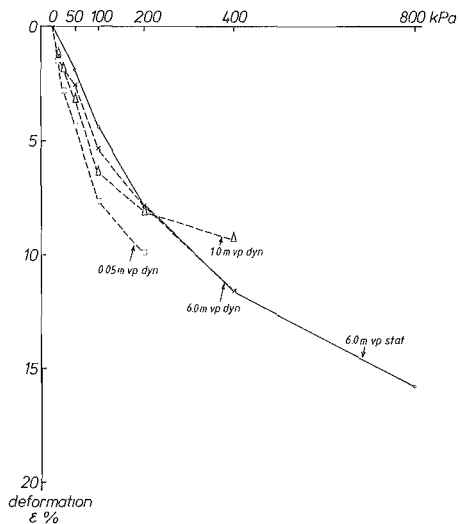


Fig. 4.5. Sätuna, alv.

Jämförelse av packningskurvorna under statisk och dynamisk, pulserande last vid avslugningar i intervallet 0,05 m vp och 6,0 m vp.

Sätuna, subsoil.

Comparison of compaction curves under static and dynamic, pulsating loads with tension in the range 0.05 m to 6.0 m water column.

tes deformationen för dynamisk last vid tre avsugningssteg, 0,05 m, 1,0 m och 6,0 m vp. Packningskurvan för statisk last är framtagen endast vid 6,0 m vp. Den utgör medeltalet av 7 paralleller. Resultaten redovisas i fig. 4.5. De visar att packningseffekten vid dynamisk last har samband med mätnadsgraden även på denna jordtyp och att packningskurvan för dynamisk last vid 6,0 m vp är tämligen väl ansluten till motsvarande kurva för statisk last.

Packning och relaxation vid dynamisk och statisk last

De i det föregående refererade packningsstudierna av några jordtyper visar bl.a. att mätningar med dynamisk last bör utföras vid relativt hög dräneringsgrad för att störningar skall undvikas. Ytterligare av intresse är en jämförelse av det slutliga jämviktsläget och relaxationsvidden vid dynamisk och statisk last. En kompletterande studie i detta syfte har utförts på Ultunajorden i lagren matjord, plogsula och alv. Resultaten redovisas i fig. 4.6 a, b och c.

Jämförelsen avser förhållandena vid dräneringsgraden 6 m vp. Vid dynamisk last följdes deformation och återfjädring på 3 parallellprov under hela packningsförloppet. Vid statisk last startades undersökningen med 10 prov-

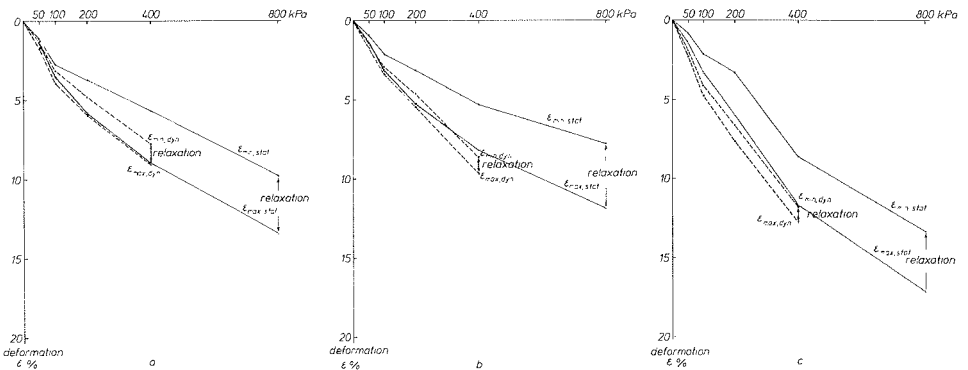


Fig. 4.6. Ultuna, a) matjord, b) plogsula, c) alv. Jämförelse av packningskurvorna med relaxation under statisk ($\epsilon_{\max,stat} - \epsilon_{\min,stat}$) och dynamisk, pulserande last ($\epsilon_{\max,dyn} - \epsilon_{\min,dyn}$) vid 6,0 m vp.

Ultuna, a) topsoil, b) plough pan, c) subsoil.

Comparison of compaction curves with relaxation under static ($\epsilon_{\max,stat} - \epsilon_{\min,stat}$) and dynamic, pulsating loads ($\epsilon_{\max,dyn} - \epsilon_{\min,dyn}$) at 6.0 m water column.

proppar och drevs till första laststeget 50 kPa. Av dessa fick 2 prov relaxera under 1 timme och de övriga 8 proverna drevs vidare till 100 kPa, varav 2 relaxerades osv. Det är att märka att relaxationstiden vid dynamiskt prov är lika med pulsintervallet, 4 s. Av diagrammen framgår att relaxationen också är väsentligt mindre vid dynamisk lastpåverkan än vid statisk. Detta är till en del beroende av att återfjädringen inte hinner helt återbildas på grund av den korta relaxationstiden. Bidragande är troligen också att den dynamiska lasten är mera aggressiv och bryter ned elastiska bryggor i markskelettet. Av stort intresse i denna jämförelse är det förhållandet att packningskurvan vid statisk last ($\epsilon_{\max, \text{stat}}$) ligger inom relaxationsområdet för dynamisk last ($\epsilon_{\max, \text{dyn}} \sim \epsilon_{\min, \text{dyn}}$). Detta visar att packningskurvan för statisk last ($\epsilon_{\max, \text{stat}}$) utgör en god approximation av deformationen i markprov till följd av utifrån pålagda spänningar av dynamisk karaktär. Det är också ett samband som med rimlig arbetsinsats och kostnad kan tas fram i markmekaniska studier. I de hittills utförda profilstudierna, ett tjugotal, har sambandet $\epsilon_{\max, \text{stat}} = f(p)$ bestämts med 4 paralleller för varje 10 cm-nivå ned till 1,0 m djup av torrskorpan.

Några sammanfattande synpunkter

Syftet med denna delundersökning och redovisning har varit att belysa packningsförloppen vid de olika lastslagen, dynamisk och statisk, för att finna avvikelser och samstämmighet och i vad mån den enklare bestämningen med statisk last av packningsbenägenheten ger ett användbart värde för beräkning av packningen under rörliga ytlaster. Om porsystemet är nära mättat som vid 0,05 m vp får det fria porvattnet en pulserande rörelse i fas med den dynamiska lasten. Detta påverkar och destruerar markskelettet. Man får en stark sättning och till slut en flytning av materialet. Även i dräneringssteget 1,0 m vp är det en avsevärd rörelse av vatten i porsystemet som påverkar markskelettet och dess packningsbenägenhet. Vid 6,0 m vp är däremot det grova porsystemet tömt på vatten. Rörelsen av det kvarvarande porvattnet i det fina porsystemet är begränsat och därmed också påverkan av markskelettet. Packningen för de två lastslagen blir därför vid 6,0 m vp mera likartad såsom framgår av resultaten från de tre undersökta jordtyperna. De två lastslagen ger alltså upphov till skilda influenser i markskelettet som dock utjämnas vid ökad dränering. Den dynamiska påkänningen bryter också elastiska bryggor i markskelettet med lägre relaxation som följd. Den avslutande jämförelsen av packning och relaxationsvidd under de två lastslagen visar att packningskurvan för statisk last ger en godtagbar bild av packningsförlopp i markprover. Packningsbenägenheten såsom den erhålles i kompressometerprov med statisk be-

lastning kan utgöra underlag för t.ex. skattning av packningen på olika djup i markprofilen för de trycktillskott med i huvudsak dynamisk karaktär som uppkommer under fordonslast.

5. PACKNINGSBENÄGENHETEN I ETT ANTAL SVENSKA ÅKERMARKSTYPER

Kompressionsundersökningar enl. den beskrivna metodiken med statisk belastning har utförts på profiler representerande jordtyper med såväl friktions- som kohesionskaraktär. Försöksfält där profiler tagits ut är förtecknade länsvis i tab. 5.1. En för varje profil typisk kornstorleksfördelning anges, varav framgår att jordar med lerhalter från 9 till 86 % ler är representerade.

Från samma fält och provplatser föreligger också data över de fysikaliska egenskaperna. Dessa undersökningar har utförts tidigare i samband med studier av olika grödors vattenförbrukning eller fältförsök i dränering, bevattning, jordbearbetning m.m. Resultaten av de fysikaliska undersökningarna finns sammanfattade i tabell- och diagramform i serien "Studier av markprofiler i svenska åkerjordar" (Andersson 1955, Andersson och Wiklert fr.o.m. 1960) som är under utgivning från Institutionen för markvetenskap, Avd. för hydroteknik. I dessa studier av totalt omkring 250 markprofiler är de fysikaliska egenskaperna bl.a. belysta med djupdiagram över kornstorleksfördelning, makroaggregatfördelning och volymförhållanden. Vidare är bindningskurvor, dvs. samband mellan vattenhalt och bindningstryck, för typiska lager i profilen angivna. Dessa data utgör en värdefull bakgrund till studien av de mekaniska egenskaperna i denna undersökning. De erbjuder dels en möjlighet till bedömning av representativiteten av de profiler som ingått i denna studie av de markmekaniska egenskaperna dels underlag till analys av samband mellan t.ex. porositet, porstorleksfördelning och deformationsegenskaper.

Några data över porositet och porstorleksfördelning i svenska åkerjordar som bakgrund till deras deformationsegenskaper

En övergripande bearbetning av en del av det omfattande markfysikaliska faktamaterialet över de vattenhållande egenskaperna hos svenska jordarter har publicerats av Andersson och Wiklert (1972). Den vattenhållande förmågan belyses med bindningskurvor, totalt för omkring 400 marklager (jordarter). Eftersom lerhalten är den viktigaste jordartsbestämmande variabeln, har i nämnda översikt en indelning efter halten ler skett enl. schemat: < 2 %, 3-5 %, 6-10 %, 11-15 % --- 81-85 %, 86-90 %. Matjordar är representerade

t.o.m. lerklass 55-60 %. Inom varje lerklass redovisas bindningskurvan för 8 matjordsarter och 15 alvjordarter. Av kurvskaran inom resp. lerklass med en spridning betingad främst av skilda utgångsporositeter har en medelbindningskurva typisk för lerklassen bildats. Dessa medeltalskurvor utgör till sist underlag för ett diagram över sambandet lerhalt-vattenhållande för- måga, som ger en allmän översikt av porositet och porstorleksfördelning i svenska åkerjordar (Andersson och Wiklert 1972, sid. 139, fig. 60).

Tabell 5.1. Förteckning över provplatser ordnade länsvis med typisk kornstorleksfördelning och allmän jordartsbeteckning för alven.

List of sampling sites and soil types in the subsoil.

Provplats/län	Kornstorleksfördelning sand-mo - mjäla - ler, %	Jordart enl. NJF: nomenklatur
Sample site/county	Particle size distri- bution	Soil type accord- ing to NJF
Grävsta, Uppsala län	2 - 38 - 28 - 32	mellanlera
Skillsta, Uppsala län	1 - 4 - 22 - 73	mycket styv lera
Säby, Uppsala län	1 - 46 - 23 - 30	mellanlera
Sätuna D., Uppsala län	1 - 25 - 32 - 42	styv lera
Kungsängen, Uppsala län	2 - 17 - 27 - 54	gyttjelera
Ultuna D., Uppsala län	1 - 15 - 26 - 58	styv lera
Hovgården, Östergötlands län	3 - 5 - 16 - 76	mycket styv lera
Häradshammar, Östergötlands län	1 - 4 - 18 - 77	mycket styv lera
Lönhult, Malmöhus län	1 - 4 - 25 - 69	mycket styv lera
Övragård, Malmöhus län	1 - 7 - 35 - 54	styv lera
Gammalstorp, Skaraborgs län	6 - 10 - 53 - 32	mellanlera
Gunnarstorp, Skaraborgs län	2 - 12 - 27 - 59	styv lera
Vrå Nolgården, Skaraborgs län	1 - 3 - 10 - 86	mycket styv lera
Uddeholm, Värmlands län	1 - 8 - 73 - 18	mjällera
Falkenå, Örebro län	1 - 24 - 31 - 44	styv lera
Bengtsbo, Västmanlands län	1 - 3 - 23 - 73	mycket styv lera
Kloster, Kopparbergs län	1 - 11 - 53 - 35	mellanlera
Älvgården, Kopparbergs län	1 - 48 - 42 - 9	lerig mo
Röbäcksdalen, Västernorrlands län	2 - 44 - 44 - 10	lerig mo

I detta sammanhang har det nämnda faktamaterialet formats i ett diagram (fig. 5.1) som belyser hur porutrymmet för det växttillgängliga vattnet i marken är fördelat på olika porstorlekar inom respektive lerklass. Det betraktade porutrymmet som alltså ligger inom bindningstrycket 150 m vp uppdelas på porstorleksgrupperna > 30 µm, 30 µm-5 µm, 5 µm-0,6 µm och 0,6 µm-

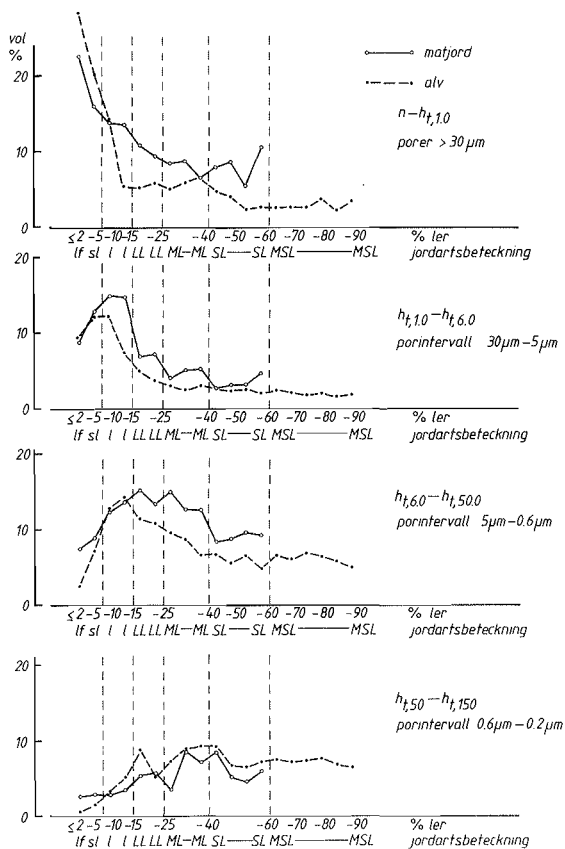


Fig. 5.1. Diagram över sambandet mellan lerhalt och volymprocent upptagbart vatten i fyra bindningstrycksintervall - däremot svarande porintervall. Enl. data över svenska minerogena jordarter (Andersson och Wiklert 1972).

Relationship between clay content and volume percent of available water in four tension ranges or corresponding pore ranges. According to data on Swedish minerogenic soils (Andersson and Wiklert 1972).

0,2 μm. Gränserna mellan områdena motsvaras av 1,0, 6,0, 50 och 150 m vp. Dessa gränser ansluter i stort till i litteraturen förekommande porgruppsförslag (Odén 1957, Brewer 1964, Bouma 1981). En strävan i dessa har varit att göra indelningen efter funktionen. Greenland (1977) föreslår också att nomenklaturen bör hänvisa till funktionen och inte enbart utgöra en storleksangivelse. Man finner vidare vid jämförelse av olika porindelningar att gränsvärden för en och samma funktion skiftar. Det kan snarare anges gränsvärden än skarpa gränser mellan olika porgrupper. Den första gränsen vid bindningstrycket 1,0 m vp ligger t.ex. inom ett område som i olika porgruppsförslag går från 0,5-1,5 m vp. Den ger en uppfattning om mängden grova porer

som medger snabba vattenrörelser och friläggs vid dränering till normaldjup. Dessa porer har stor betydelse för t.ex. markventilationen och rotutvecklingen. Porer inom denna porgrupp deformeras å andra sidan redan vid begränsade yttre påkänningar. Den andra gränsen har lagts vid bindningsstrycket 6,0 m vp. En gräns inom en zon 5-9 m vp är ur markmekanisk synpunkt av intresse, eftersom den synes avgränsa de delar av markrummet som tydligt påverkas av yttre krafter. Inom zonen har 6,0 m vp valts med hänsyn till att man i rutinmässiga analyser med undertrycksteknik vid detta bindningsstryck kan arbeta säkert med få störningar. Dessa inträder oftare vid 8-9 m vp som är övre gränsen för denna teknik. Pormängden > 5 µm redovisas också i ett separat diagram (fig. 5.2.).

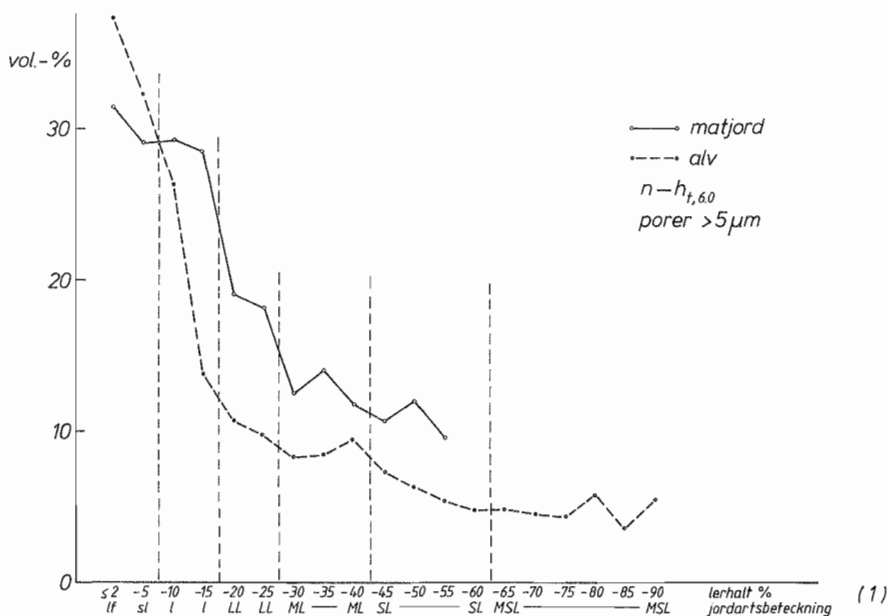


Fig. 5.2. Diagram över sambandet mellan lerhalt och volymprocent vatten som dräneras av intill bindningsstrycket 6 m vp; porer > 5 µm.

Relationship between clay content and volume percent of water drained off up to a tension of 6 m water column; pores > 5 µm.

1) Soil type according to NJF (Nordic Agricultural Research Workers Association) nomenclature.

Gränsen 50 m vp (porer > 0,6 µm) har av Andersson och Wiklert (1972) angivits som intressant med hänsyn till att den tycks utgöra en gräns för den naturliga lagringens, strukturens och packningens inflytande på funna jämviktstvattenhalter. Såsom framgår av den följande redovisningen av packnings-

inflenser på markrummet synes porer i intervallet 5-0,6 μm påverkas endast i ringa grad och porer i intervallet 0,6-0,2 μm är helt opåverkade. Bedömningen kompliceras av att det under deformationsprocessen förekommer en omfördelning i porsystemet så att pormängden i ett studerat intervall också kan få ett tillskott från ett högre porintervall samtidigt som porer inom intervallet trycks ihop.

I diagrammet fig. 5.1 är under lerhaltsskalan också jordartsbeteckningen inlagd. Gränserna mellan olika jordarter är streckade på diagramytan. Det framgår av diagrammet att vissa genomsnittliga porvolymstal för valda porstorleksklasser kan anges jordartsvis. För alvjordar kan följande tal anföras. Andelen porer > 30 μm , som ger en uppfattning om luftkapaciteten, ligger för lättleror och mellanleror i intervallet 5-7 %. Andelen sjunker i styva och mycket styva leror till intervallet 2-5 %. Detta är anmärkningsvärt låga värden. Att markventilationen i lerorna ändå är tillfredsställande beror bl.a. på kontinuiteten i markrummet. Systemet är emellertid som visas i följande avsnitt känsligt. Andelen porer i klassen 30 μm -5 μm ligger i lättlerorna mellan 4 och 6 % men sjunker i leror med lerhalter över 25 % till intervallet 2-4 %. Summan av dessa två porklasser redovisas separat i diagrammet fig. 5.2. Andelen porer > 5 μm är i genomsnitt 10 % i lättleror, 9 % i mellanleror, 6 % i styva leror och 5 % i mycket styva leror. Denna porandel har stor betydelse för markens funktion men deformeras också lättast vid påkänningar.

För de två övriga porfraktionerna, 5-0,6 μm och 0,6-0,2 μm , märks att optimet i porandel förskjuts uppåt i lerskalan till lättleror och mellanleror. I styva och mycket styva leror intar de nämnda porfraktionerna tämligen konstant del med omkring 6 % resp. 7 %, dvs. av samma storleksordning som porfraktionen > 5 μm . Porositeten i matjorden är påverkad av mullsubstansen och ligger av den anledningen på en högre nivå inom de olika porstorleksklasserna. Det allmänna sambandet med lerhalt är som framgår av diagrammet fig. 5.1 dock likartad alvjordens.

Sammanfattningsvis ger diagrammet en värdefull översikt av den genomsnittliga porfördelningen i olika slags jordar, som är av intresse vid bedömning av de markmekaniska egenskaperna och risken för skador. Anmärkningsvärt är den begränsade mängden av grova porer inom lerjordarna. För jämförelse skall här refereras sammanställningar av markfysikaliska undersökningar över dels engelska (Hall et al. 1977) dels tyska jordar (Renger 1971). I dessa anknytes också till lerhalten vid redovisningen. Det engelska materialet omfattar glaciala

jordar av likartad typ som de svenska och är därför av särskilt intresse. För 134 undersökta jordar med mer än 40 % ler anges en luftkapacitet (porer > 30 μm) av i medeltal 5,5 %, dvs. samma storleksordning som i det föregående angivits för de svenska. Det tyska materialet omfattar 450 markhorisonter från 108 olika profiler i 5 olika jordmåner av varierande karaktär bl.a. gley-, marsk- och lössjordar. Totala porvolymen varierade därför starkt även inom så snäva lerklassbredder som 5 %. Variationen är dock till stor del utjämnad vid porgränsen 10 μm . Porer > 10 μm upptar 3-7 % volymandelar av jorden vid lerhalter över 40 %.

Resultat av markmekaniska profilstudier

Provtagning för markmekanisk analys gjordes invid de punkter på fälten där provtagning skett för fysikalisk analys. Den utfördes i 10 cm nivåer till 1 m djup. Antalet provproppar per lager har som standard varit 4. På provpropparna utfördes kompressometerstudier vid statisk belastning vid två dräneringssteg, 0,05 m vp och 6,0 m vp.

Redovisningsformer av enskilda profiler

De mekaniska egenskaperna hos de studerade profilerna redovisas med hjälp av fyra diagram så valda att de ger en överblick av profilen, fig. 5.6 t.o.m. 5.24. Med hjälp av primärdata om deformationen kan ytterligare andra bearbetningar göras som kan vara mera anslutande till frågeställningar under studium. De fyra standarddiagrammen beskrives närmare här nedan.

$n = f(p)$ -diagrammet. Detta diagram belyser sambandet mellan porositet (n) och trycktillskott (p), $n = f(p)$, i valda lager, i allmänhet matjord, plogsula och alv. Vid redovisning av packningsbenägenheten hos jordar är i jordbrukssammanhang inverkan på porvolymen angiven som porositet av främst intresse. Den resulterande porositeten (n) efter varje laststeg beräknas ur relativa kompressionen (\mathcal{E}) enl. tidigare angivet beräkningssätt (sid.21). Sambandet kan alternativt redovisas med trycket p i linjär eller logaritmisk skala. En linjär skala underlättar en okulär bedömning av kurvan. Kompressionskurvan faller i allmänhet relativt snabbt för trycktillskott upp till 200 kPa. Den planar sedan ut för att med höga trycktillskott gå asymptotiskt mot ett minimivärde på porositeten. Det av Kezdi (1969) föreslagna exponentielluttrycket $n = a + b \cdot e^{cP}$ har prövats och visat sig ge god anslutning till de experimentella värdena. Betydelsen av konstanterna a , b och c framgår av fig. 5.3. Summan $a + b$ ger utgångs porositeten, n_0 . Storleken av c anger

hur snabbt kurvan avtar och belyser således packningsbenägenheten. Eftersom kurvan är fallande har koefficienten c negativt värde. a anger det värde som porositeten asymptotiskt går mot vid höga trycktillskott. Koefficientbestämningen göres genom iterationsförfarande, varvid iterationen drives tills viss på förhand bestämd minimiavvikelse nåtts. Bakgrunden för den matematiska behandlingen och metodik för koefficientbestämningen finns närmare angiven av Sommer (1975). Den statistiska bearbetningen i datamaskin har gjorts enl. Marquardts metod. Modifieringen av denna metod och anpassningen av standardprogrammen till mätdata i denna undersökning liksom utformningen av tabellutskrifterna har utförts av Dag Åstrand vid Lantbruksuniversitetets Dataavdelning. Det experimentella materialet har primärt redovisats för varje provpropp. Medeltal har formats för varje 10 cm lager och vidare för profildelar med likartade utgångsporositeter och deformationsegenskaper. För profilen särskiljs i första hand matjord och alv. Alven har dock i flera profiler icke varit enhetlig utan krävt en ytterligare uppdelning i t.ex. plogsula, central del och bottendel. Vid den översiktliga redovisningen av profilerna i diagramform redovisas sådana medeltal.

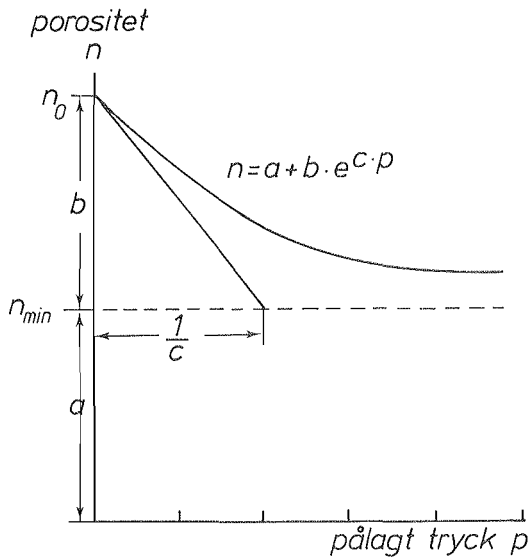


Fig. 5.3. Schematiskt diagram över sambandet mellan porositet (n) och pålagd last (p) vid linjär axelindelning. Innebörden av koefficienterna a , b och c i anslutande exponentialfunktion $n = a + b \cdot e^{c \cdot p}$.

Schematic diagram of the relationship between porosity (n) and applied load (p). Coefficients a , b , and c in the exponential function: $n = a + b \cdot e^{c \cdot p}$.

Inom geotekniken redovisas oftast sambandet mellan spänning och deformation med spänningen, p , i logaritmisk skala. Kompressionskurvan är till en början konkav uppåt men övergår från förkonsolideringspunkten som regel i en rät linje eller den kan utjämnas till en rät linje. Gäller kurvan en icke tidigare belastad jord kallas den jungfrukurva. I det halvlogaritmiska framställnings sättet kan jungfrukurvans linjära del definieras med en koefficient som anger dess lutning. I svensk geoteknisk praxis anges den raka kurvdelens lutning med en koefficient (\mathcal{E}_2) som anger relativa kompressionen vid en fördubbling av trycket p . Koefficienter eller index av detta slag används sedan i sättningsberäkningar inom geotekniken.

Denna redovisningsform har också prövats på föreliggande material (fig. 5.4 och 5.5). Även karakteristika för kurvan såsom kompressionsmodul och modul-

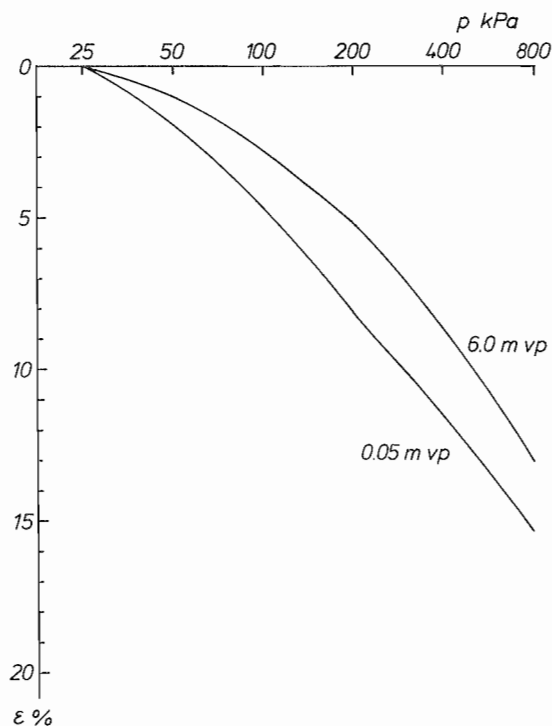


Fig. 5.4. Sambandet mellan relativ deformation (\mathcal{E}) och pålagd last (p) i logskala. Ultuna, lerjord, lager 35-37,5 cm vid olika tension (0,05 m och 6,0 m vp).

Relationship between relative deformation (\mathcal{E}) and applied load (p) in log scale. Ultuna clay, 35-37.5 cm at different tensions (0.05 m and 6.0 m water column).

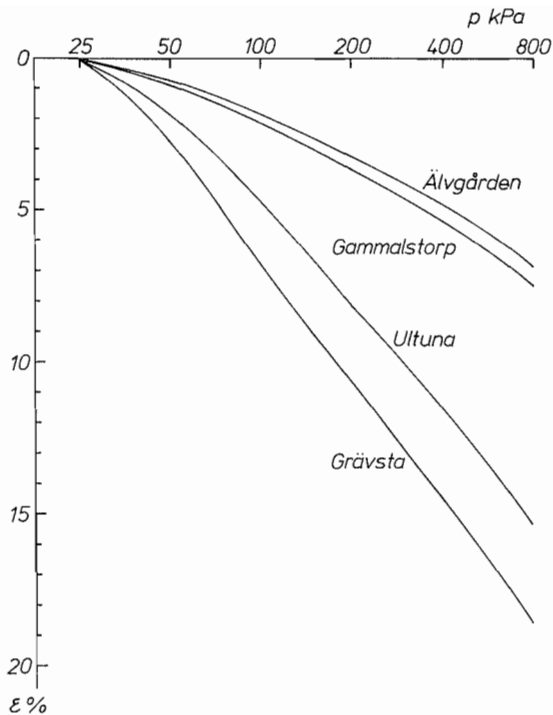


Fig. 5.5. Sambandet mellan relativ deformation (ϵ) och pålagd last (p) i logskala. Alvprov från Älvgården, Gammalstorp, Ultuna och Grävsta vid en och samma tension 0,05 m vp.

Relationship between relative deformation (ϵ) and applied load (p) in a log scale. Subsoil samples from Älvgården, Gammalstorp, Ultuna and Grävsta at the same tension (0.05 m wc).

tal har beräknats. De mekaniska egenskaperna i torrskorpeprov är sådana att sambandet har en jämnt förlöpande bågform. Varken förkonsolideringspunkten eller en rät linje kan klart avskiljas, varför viss osäkerhet vidlåder koefficientangivelserna. Denna ansats av redovisningen fördes därför ej vidare.

$n = f(z, p)$ -diagrammet. I föreliggande redovisning ingår ett djupdiagram, $n = f(z, p)$, där porositeten i olika lager ned till 1 meters djup anges som funktion av pålagt tryck. Förutom utgångs porositeten, n_0 , anges porositeten efter 200 kPa och 800 kPa trycktillskott. För jämförelse är också inlagt vattenhaltskurvan vid 6,0 m vattenavförande tryck. Med denna kurva avgränsas porandelen större än ca 5 μ m. Man har därvid möjlighet att bedöma inverkan av trycket på denna viktiga del av markrummet.

$n_p = f(n_o)$ -diagrammet. I diagrammet anges den slutliga porositeten, n_p , som jordprov med viss utgångsporositet (n_o) tenderar att gå mot, efter trycktillskott av 200 kPa resp. 800 kPa. Redovisning av kompressionsdata i denna form erbjuder en möjlighet att överblicka en större datamängd. I den översiktliga redovisningen ingår samtliga provproppar från profilen, i allmänhet 40 provproppar. Av diagrammet framgår också variationsvidden i porositet inom det undersökta profildjupet. Variationen i porositet innefattar här såväl variationen inom lager, vanligen < 2 %, som mellan olika lager eller olika delar av profilen. De ur mätmaterial beräknade regressionslinjerna för slutlig porositet efter påförd last av 200 kPa och 800 kPa finns inlagda med regressions- och korrelationskoefficienter. Inom tryckområdet 0-800 kPa utjämnas olika porositeter endast delvis. Förändringen i regressionskoefficienterna är av den anledningen ringa. Korrelationskoefficienterna är höga. Dessa resultat bekräftar det i andra undersökningar (Sommer 1975) funna förhållandet att kompressionskurvor från proppar av samma jordtyp icke skär varandra. Detta innebär att det är det grova porsystemet som deformeras och bestämmer packningskurvas förlopp och i mindre grad totala porsystemet.

$\mathcal{E} = f(p, t)$ -diagrammet. Tidsdiagram i olika former utgör viktiga möjligheter att belysa det inre skeendet i provproppar under belastning (jfr här kap. 4). I detta diagram redovisas i staplar totala och initiala deformationen samt i flertalet fall relaxationen efter 800 kPa last vid dels 0,05 m och dels 6,0 m vp tension. Redovisningen är begränsad till alvdelen av profilen, i allmänhet 30-100 cm. Antalet upprepningar eller provproppar bakom medeltalet är därför i allmänhet 16. Med initial sättning avses deformationen efter 15 s som erhålles direkt ur avläsningsprotokollet. Vid mätningen kan man iaktta att det sker en mycket snabb, initial sättning inom en tidsrymd av någon sekund. Denna är emellertid inte möjlig att följa med okulär avläsning på mätlocka. Den mycket snabba, ögonblickliga sättningen kan emellertid skattas i ett diagram med tiden i \sqrt{t} -skala. Jfr fig. 2.2. För att reducera redovisningsarbetet har dock initialsättningen inte tagits fram grafiskt på detta sätt i denna översiktliga redovisning. För att möjliggöra redovisning av ett stort mätmaterial har vidare diagramtypen med staplar formats. Skillnaden i den initiala sättningen vid olika mätningsgrad tyder på att porvattnets rörelsemöjligheter inverkar på sättningens hastighet. Nedbrytningen av makroporer (maskhål, rotkanaler och sprickor) innebär avsevärd massförflyttning varför mängden av dessa porer starkt påverkar första delen av tidskurvan.

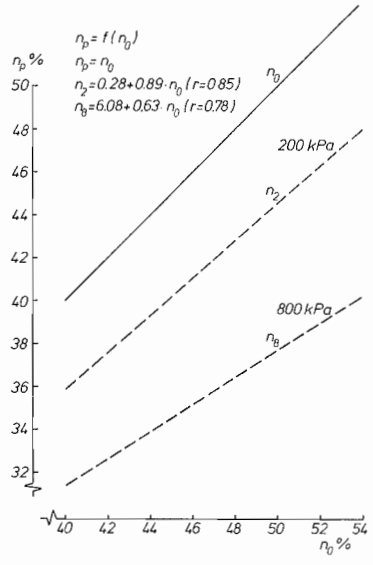
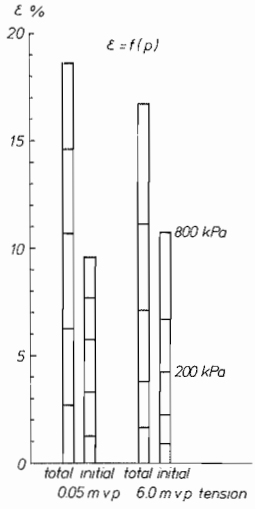
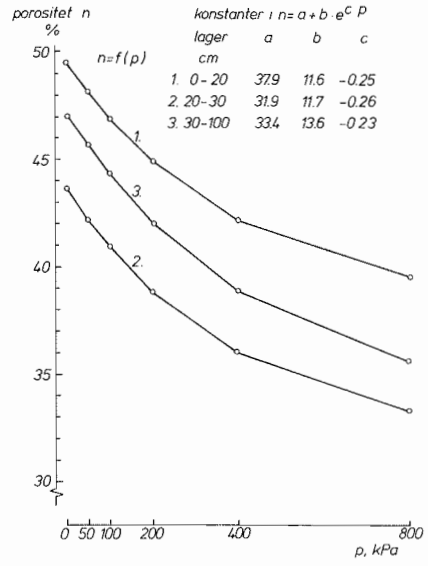
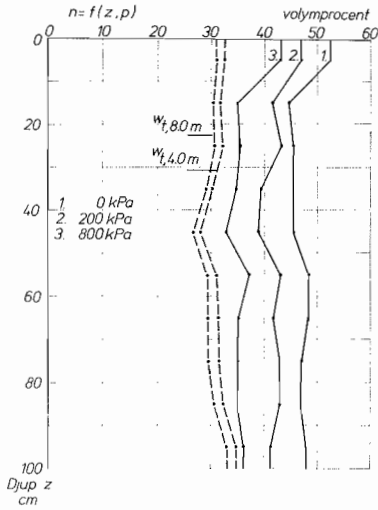


Fig. 5.6. Grävsta, Uppsala län. Mekaniska egenskaper. Grävsta, Uppsala county. Mechanical properties.

Lager, cm	Mull	Sand	M ₀	Mjåla	Ler, %	Jordart enl. NJF
Layer, cm	Humus	Sand	F.sand	Silt	Clay, %	Soil type (NJF)
1. 0-20	2	2	36	31	29	Mellanlera, mf
2. 20-30	2	2	36	31	29	Mellanlera, mf
3. 30-100	-	2	38	28	32	Mellanlera

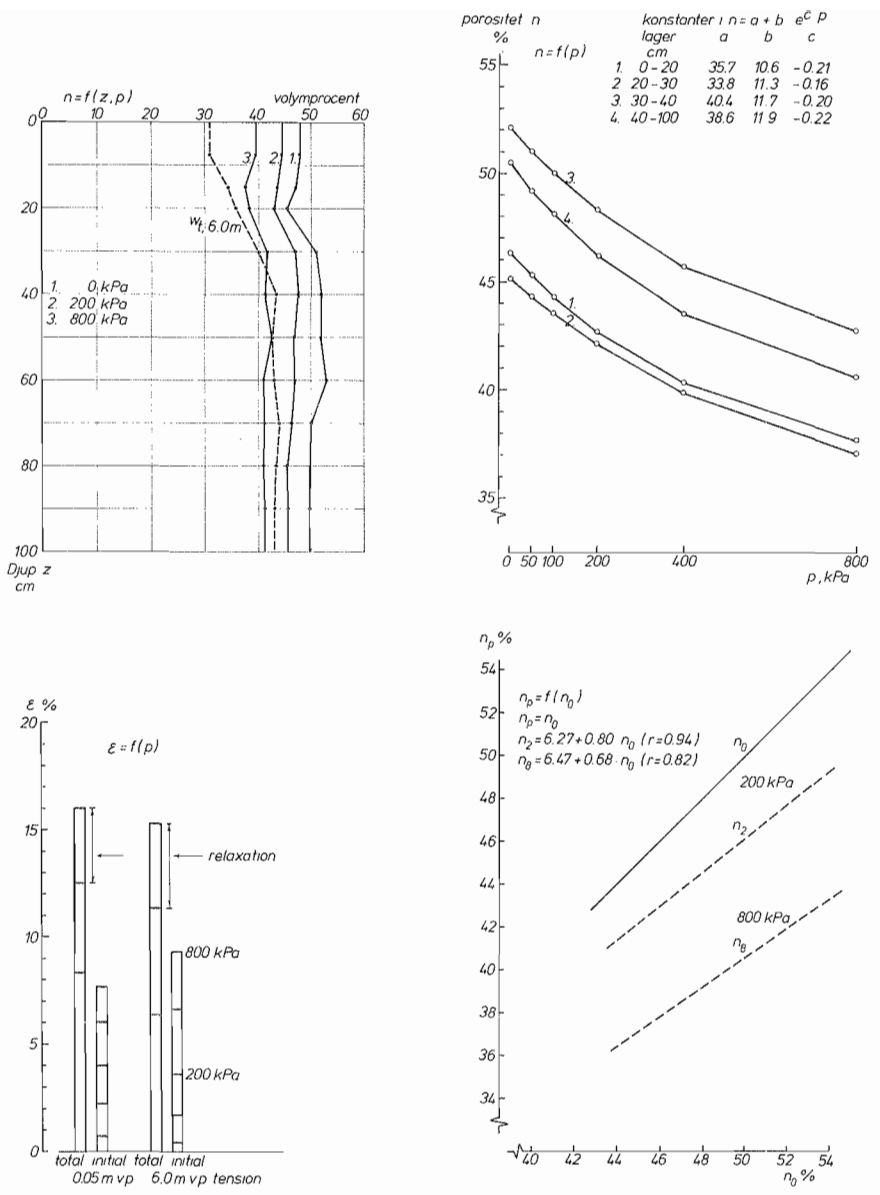


Fig. 5.7. Skillsta, Uppsala län. Mekaniska egenskaper. Skillsta, Uppsala county. Mechanical properties.

Lager, cm	Mull	Sand	Mo	Mjåla	Ler, %	Jordart enl. NJF
Layer, cm	Humus	Sand	F.sand	Silt	Clay, %	Soil type (NJF)
1. 0-20	3	10	21	24	42	Styv lera, nmh
2. 20-30	2	10	22	24	42	Styv lera, nmh
3. 30-40	-	3	6	15	76	Mycket styv lera
4. 40-100	-	1	4	22	73	Mycket styv lera

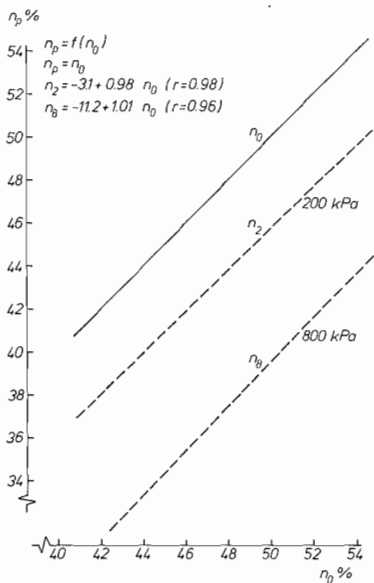
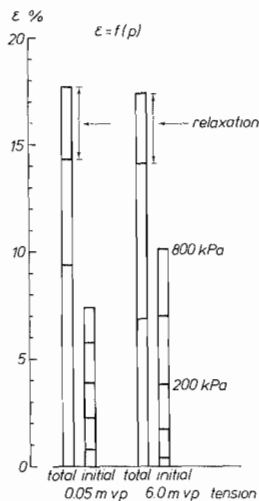
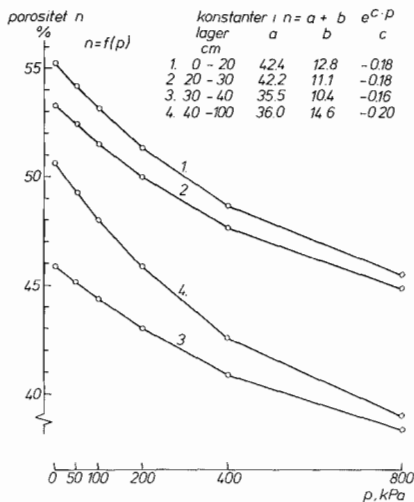
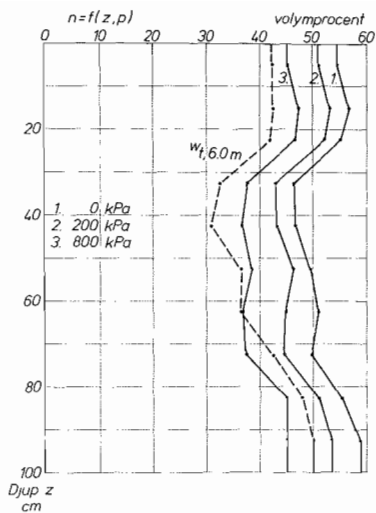


Fig. 5.8. Säby, Uppsala län. Mekaniska egenskaper. Säby, Uppsala county. Mechanical properties.

Lager, cm	Mull	Sand	Mo	Mjåla	Ler, %	Jordart enl. NJF
Layer, cm	Humus	Sand	F. sand	Silt	Clay, %	Soil type (NJF)
1. 0-30	6	1	50	19	24	Lättlera, mmh
2. 30-50	-	1	52	22	25	Lättlera
3. 50-80	-	1	46	23	30	Mellanlera
4. 80-100	-	1	12	31	46	Styv lera

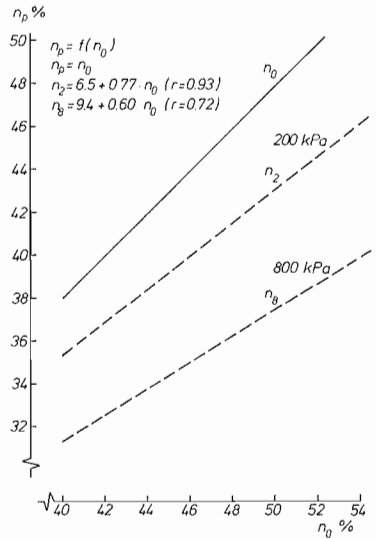
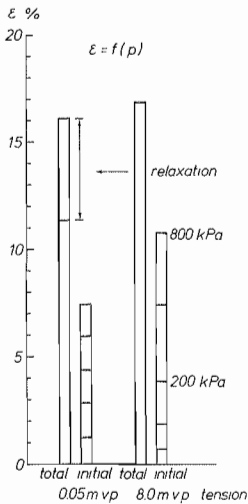
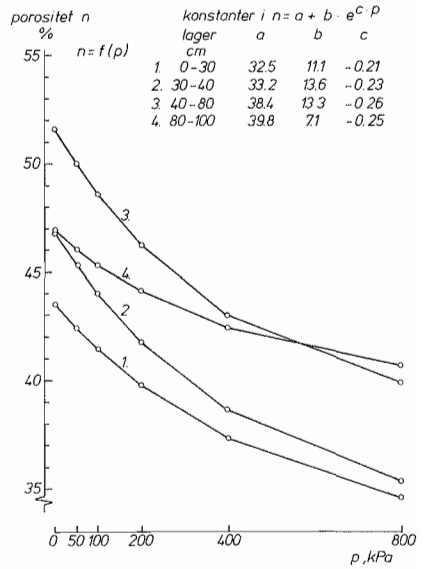
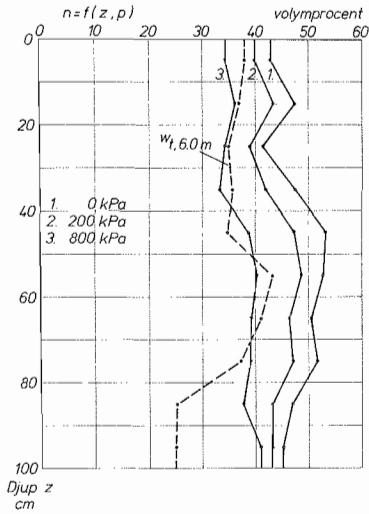


Fig. 5.9. Sätuna, Uppsala län. Mekaniska egenskaper.
Sätuna, Uppsala county. Mechanical properties.

Lager, cm	Mull	Sand	Mo	Mjåla	Ler, %	Jordart enl. NJF
Layer, cm	Humus	Sand	F.sand	Silt	Clay, %	Soil type (NJF)
1. 0-30	4	3	37	28	28	Mellanlera
2. 30-40	-	1	29	28	42	Styv lera
3. 40-80	-	1	25	32	42	Styv lera
4. 80-100	-	1	73	11	15	Lerig mo

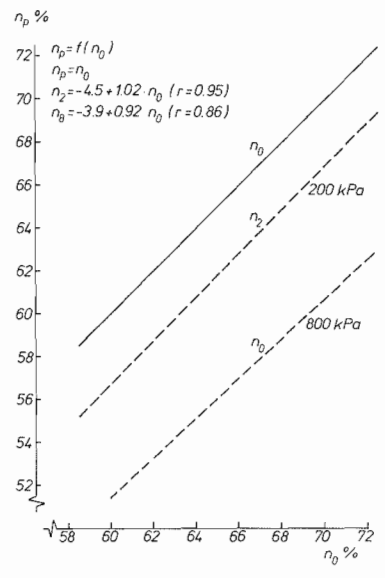
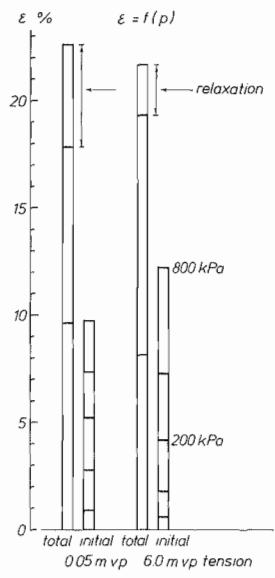
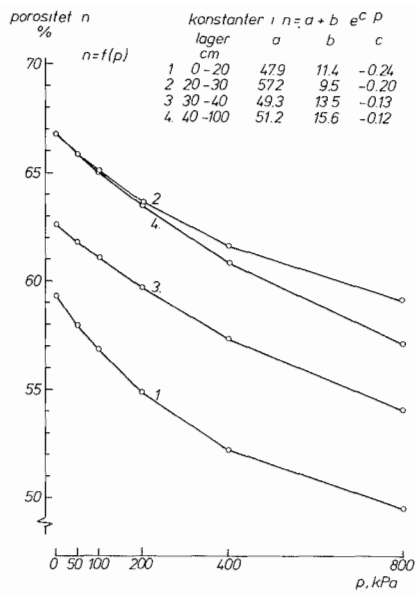
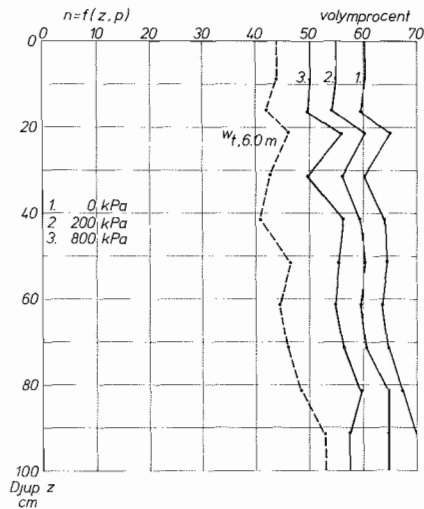


Fig. 5.10. Kungsängen, Uppsala län. Mekaniska egenskaper. Kungsängen, Uppsala county. Mechanical properties.

Lager, cm	Mull	Sand	Mo	Mjåla	Ler, %	Jordart enl. NJF
Layer, cm	Humus	Sand	F.sand	Silt	Clay, %	Soil type (NJF)
1. 0-20	6	4	11	31	46	Gyttjelera
2. 20-30	6	4	11	31	46	Gyttjelera
3. 30-40	6	1	13	28	50	Gyttjelera
4. 40-100	4	4	15	27	50	Gyttjelera

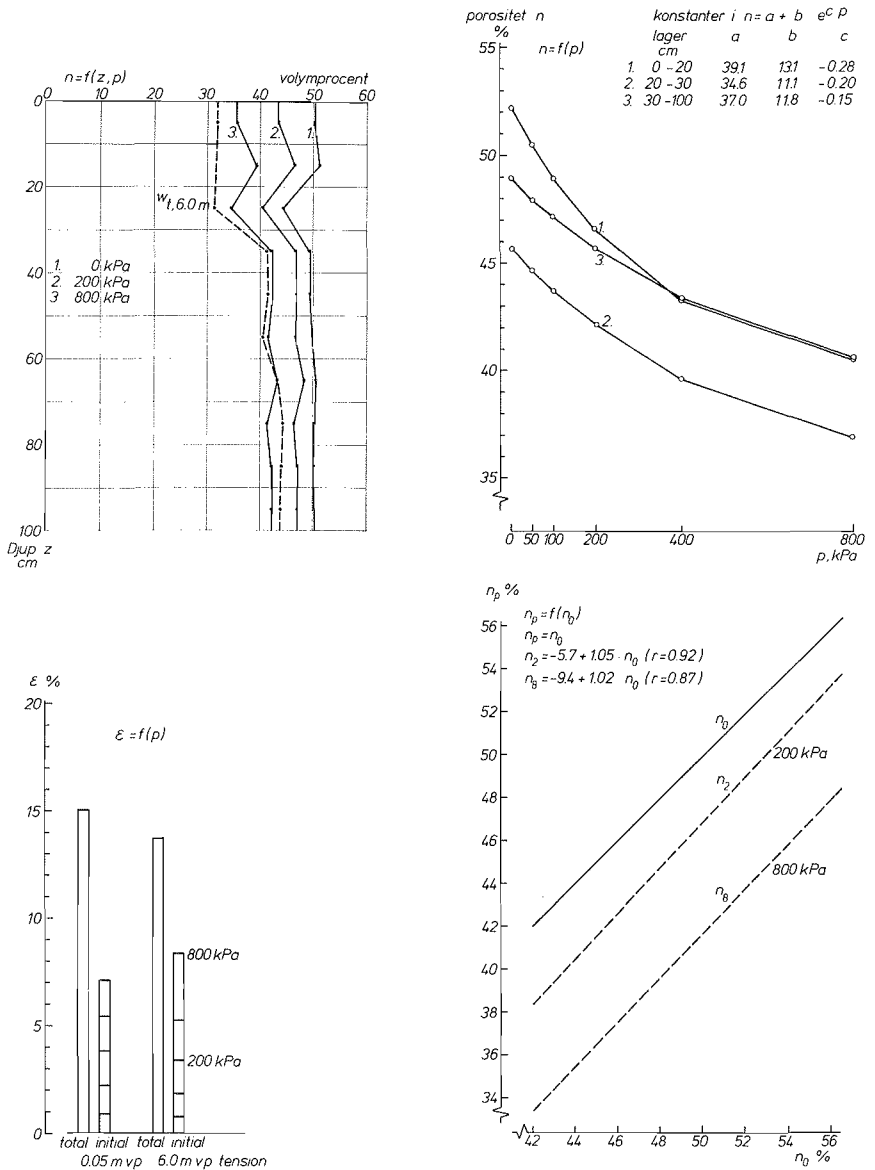


Fig. 5.11. Ultuna, Uppsala län. Mekaniska egenskaper.
 Ultuna, Uppsala county. Mechanical properties.

Lager, cm	Mull Humus	Sand Sand	Mo F.sand	Mjåla Silt	Ler, % Clay, %	Jordart enl. NJF Soil type (NJF)
1. 0-20	4	2	15	27	52	Styv lera, nmh
2. 20-30	2	2	17	28	51	Styv lera
3. 30-100	-	1	15	26	58	Styv lera

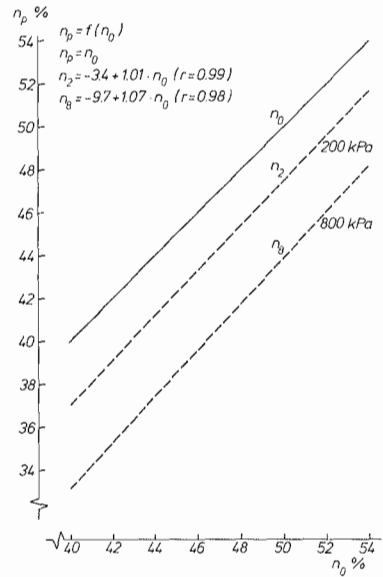
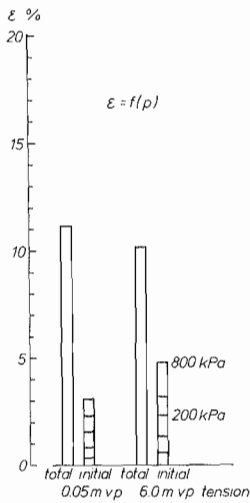
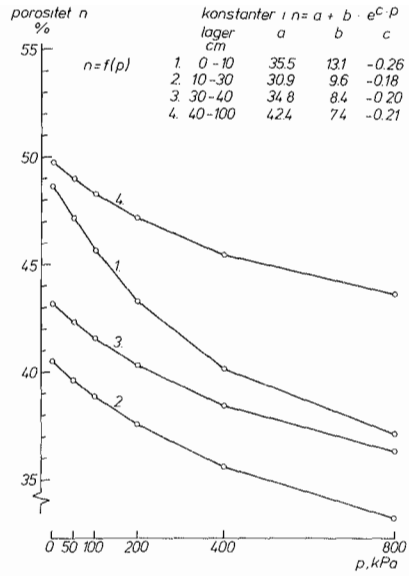
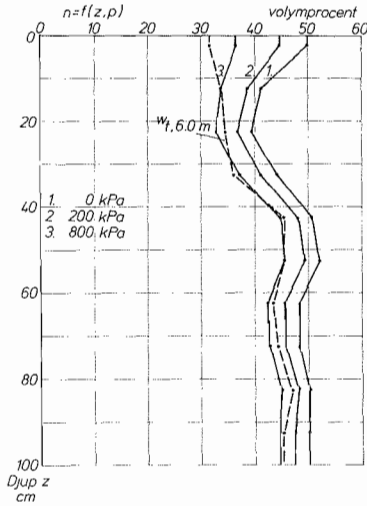


Fig. 5.12. Hovgården, Östergötlands län. Mekaniska egenskaper.
Hovgården, Östergötlands county. Mechanical properties.

Lager, cm	Mull	Sand	Mo	Mjåla	Ler, %	Jordart enl. NJF
Layer, cm	Humus	Sand	F.sand	Silt	Clay, %	Soil type (NJF)
1. 0-10	2	9	29	16	44	Styv lera, nmh
2. 10-30	2	9	29	16	44	Styv lera, nmh
3. 30-40	-	3	10	14	73	Mycket styv lera
4. 40-100	-	3	5	16	76	Mycket styv lera

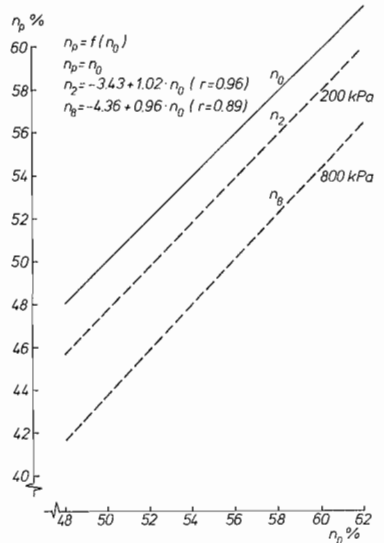
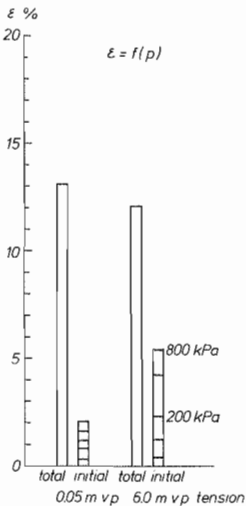
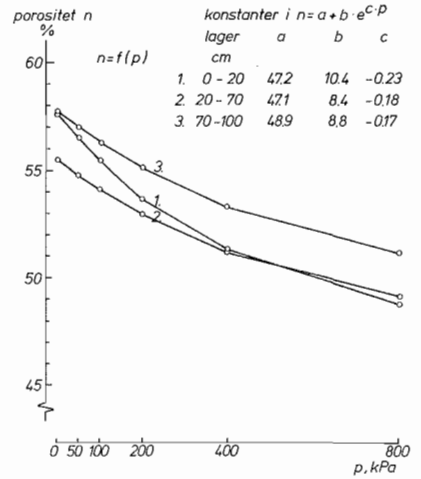
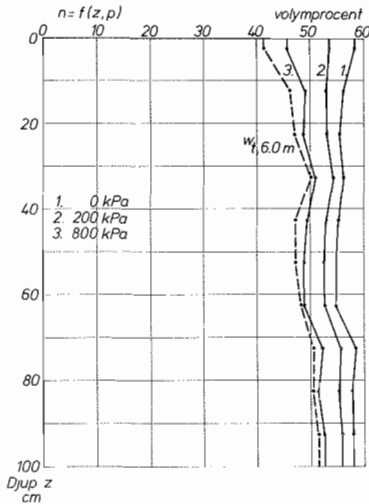


Fig. 5.13. Häradshammar, Östergötlands län. Mekaniska egenskaper Häradshammar, Östergötlands county. Mechanical properties.

Lager, cm	Mull Humus	Sand Sand	Mo F.sand	Mjåla Silt	Ler, % Clay, %	Jordart enl. NJF Soil type (NJF)
1. 0-20	2	1	4	17	76	Mycket styv lera, nmh
2. 20-70	-	1	4	18	77	Mycket styv lera
3. 70-100	-	1	3	17	79	Mycket styv lera

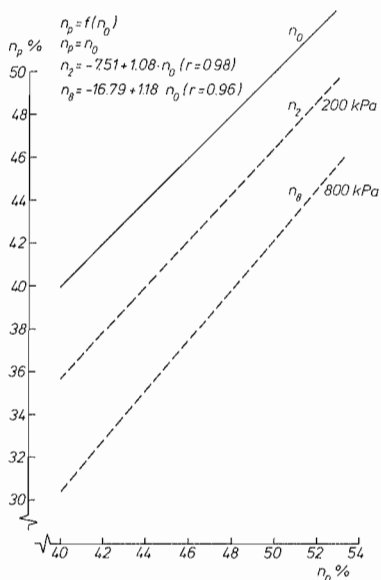
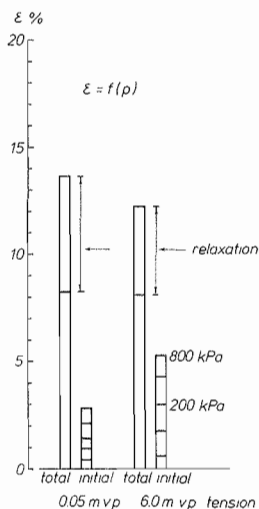
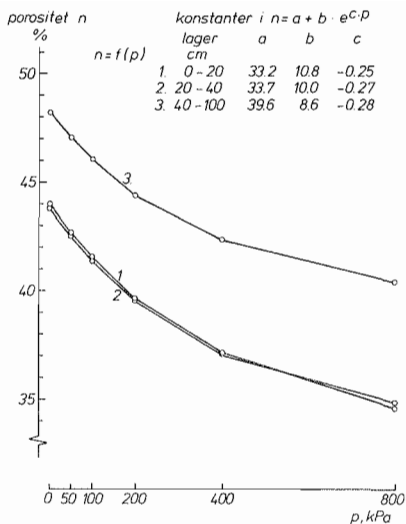
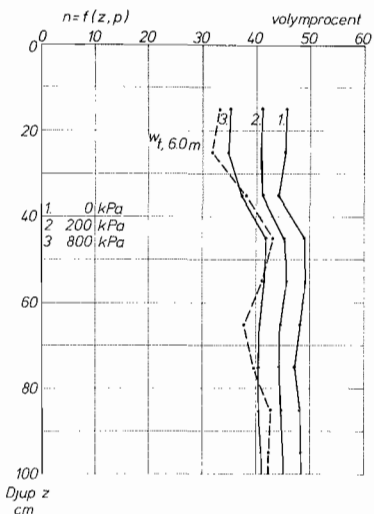


Fig. 5.14. Lönhult, Malmöhus län. Mekaniska egenskaper.
Lönhult, Malmöhus county. Mechanical properties.

Lager, cm	Mull	Sand	Mo	Mjåla	Ler, %	Jordart enl. NJF
Layer, cm	Humus	Sand	F.sand	Silt	Clay, %	Soil type (NJF)
1. 0-20	2	28	28	10	32	Morän mellanlera, nmh
2. 20-40	-	26	25	13	36	Morän mellanlera
3. 40-100	-	1	4	25	69	Mycket styv lera

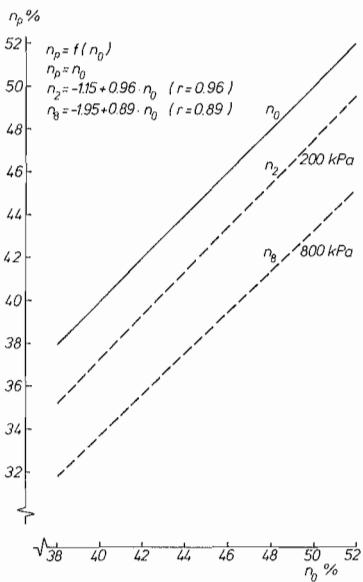
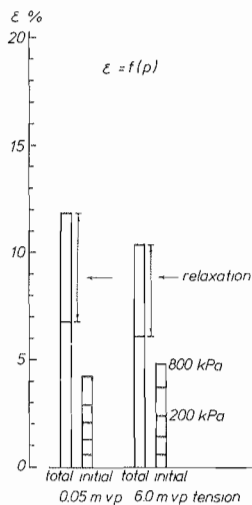
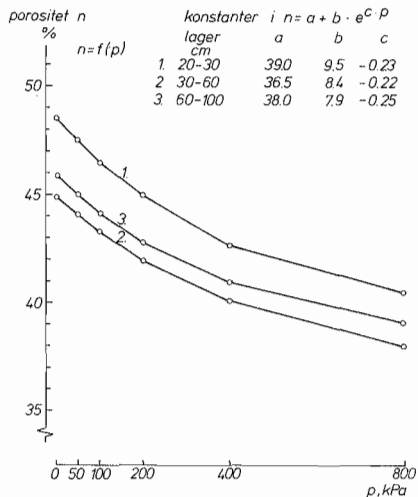
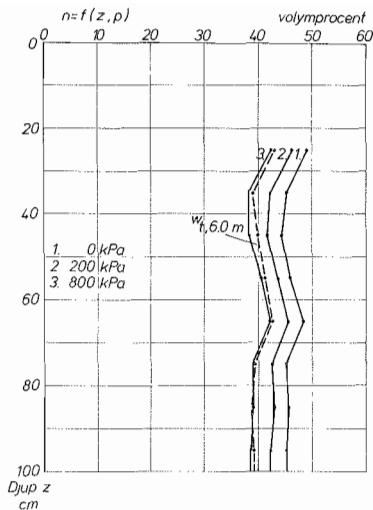


Fig. 5.15. Övrågård, Kristianstads län. Mekaniska egenskaper. Övrågård, Kristianstads county. Mechanical properties.

Lager, cm	Mull	Sand	Mo	Mjåla	Ler, %	Jordart enl. NJF
Layer, cm	Humus	Sand	F.sand	Silt	Clay, %	Soil typer (NJF)
1. 20-30	5	5	13	30	47	Styv lera, nmh
2. 30-60	-	1	7	35	54	Styv lera
3. 60-100	-	1	5	39	56	Styv lera

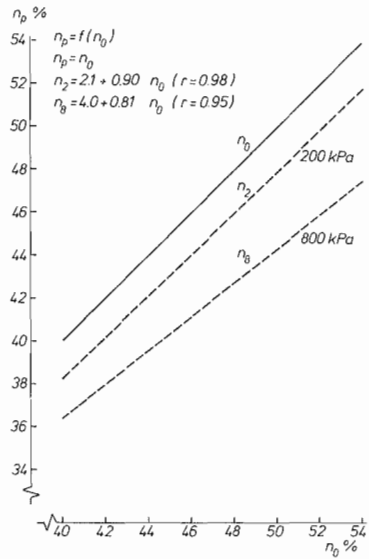
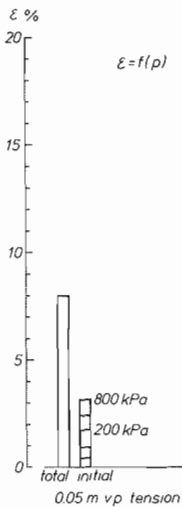
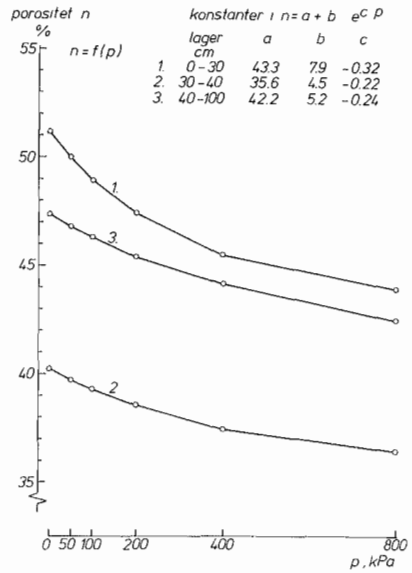
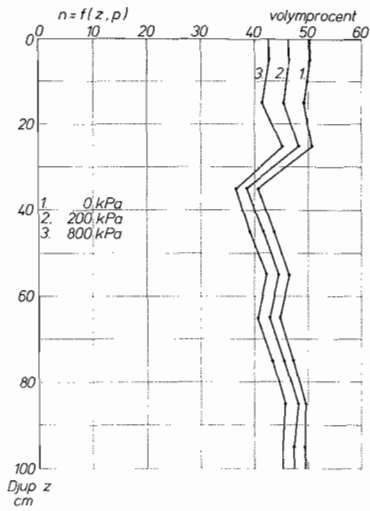


Fig. 5.16. Gammalstorp, Skaraborgs län. Mekaniska egenskaper. Gammalstorp, Skaraborgs county. Mechanical properties.

Lager, cm	Mull	Sand	Mo	Mjäla	Ler, %	Jordart enl. NJF
Layer, cm	Humus	Sand	F.sand	Silt	Clay, %	Soil type (NJF)
1. 0-30	3	6	10	50	31	Mellanlera, nmh
2. 30-40	-	6	10	52	32	Mellanlera
3. 40-100	-	3	10	42	45	Styv lera

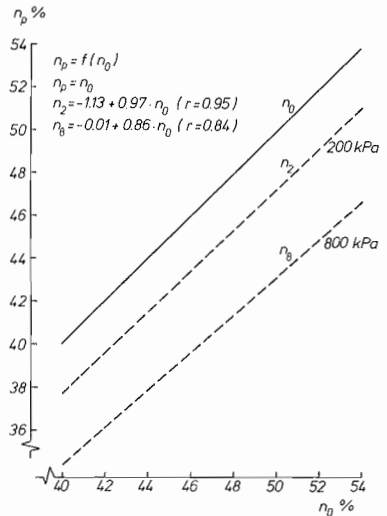
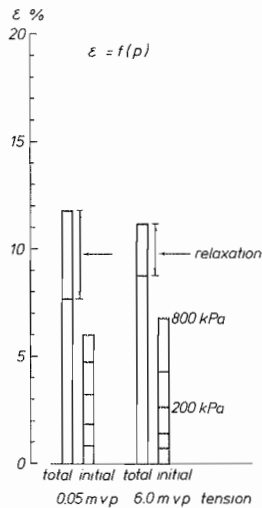
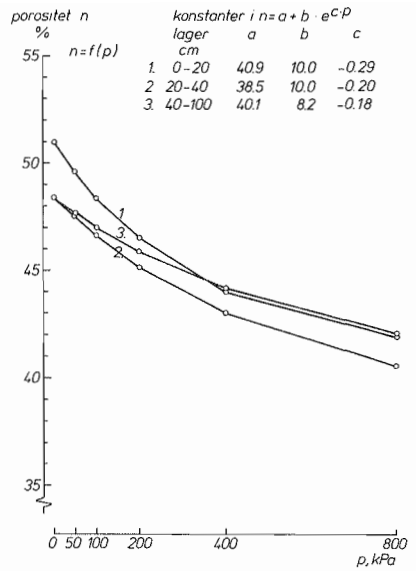
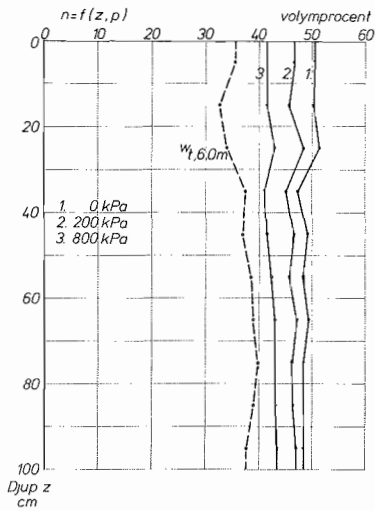


Fig. 5.17. Gunnarstorp, Skaraborgs län. Mekaniska egenskaper. Gunnarstorp, Skaraborgs county. Mechanical properties.

Lager, cm	Mull	Sand	Mo	Mjåla	Ler, %	Jordart enl. NJF
Layer, cm	Humus	Sand	F.sand	Silt	Clay, %	Soil type (NJF)
1. 0-20	5	2	17	31	45	Styv lera, mmh
2. 20-40	-	1	14	29	56	Styv lera
3. 40-100	-	2	12	27	59	Styv lera

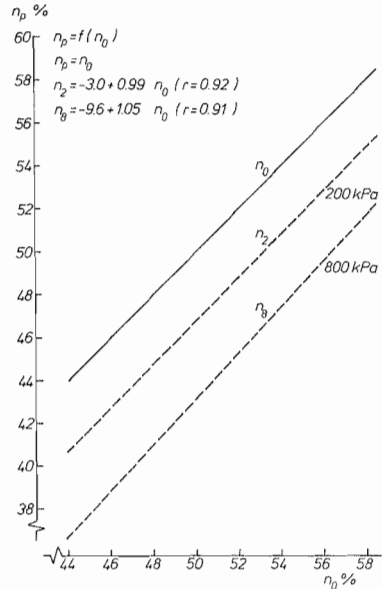
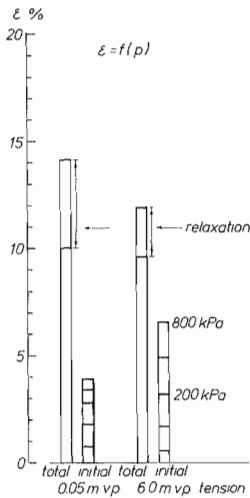
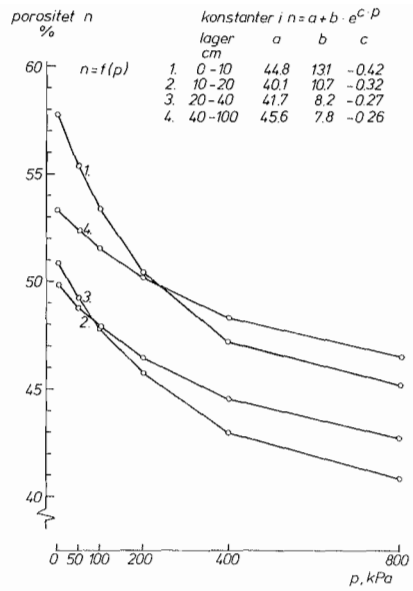
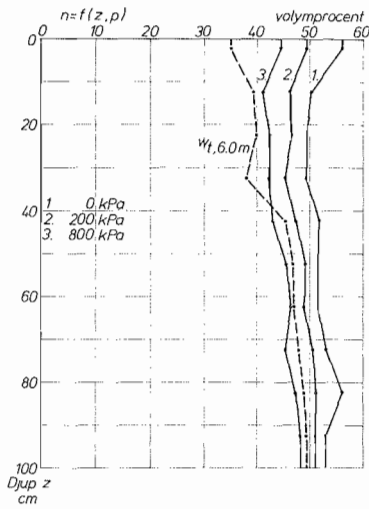


Fig. 5.18. Vrå Nolgården, Skaraborgs län. Mekaniska egenskaper. Vrå Nolgården, Skaraborgs county. Mechanical properties.

Lager, cm	Mull	Sand	Mo	Mjåla	Ler, %	Jordart enl. NJF
Layer, cm	Humus	Sand	F.sand	Silt	Clay, %	Soil type (NJF)
1. 0-10	3	6	15	19	57	Styv lera, nmh
2. 10-20	3	6	15	19	57	Styv lera, nmh
3. 20-40	-	2	6	14	78	Mycket styv lera
4. 40-100	-	1	3	10	86	Mycket styv lera

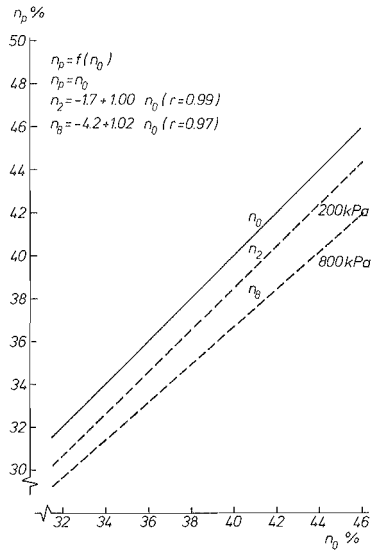
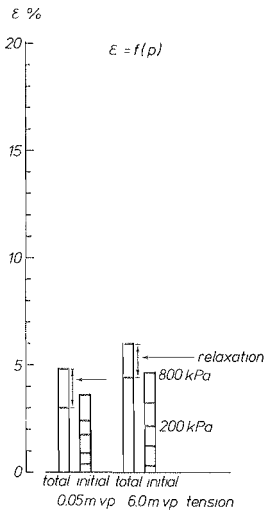
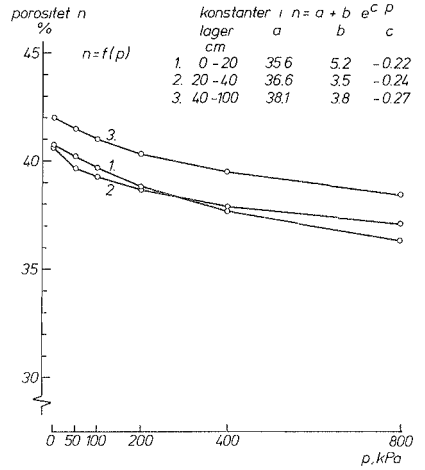
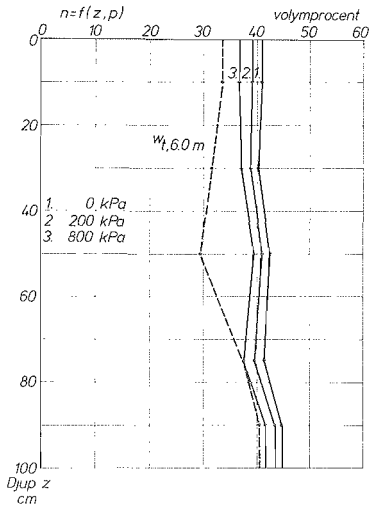


Fig. 5.19. Uddeholm, Värmlands län. Mekaniska egenskaper. Uddeholm, Värmlands county. Mechanical properties.

Lager, cm	Mull	Sand	Mo	Mjåla	Ler, %	Jordart enl. NJF
Layer, cm	Humus	Sand	F.sand	Silt	Clay, %	Soil type (NJF)
1. 0-20	4	2	12	60	20	Mjällera, nmh
2. 20-40	-	3	16	75	16	Mjällera
3. 40-100	-	1	8	73	18	Mjällera

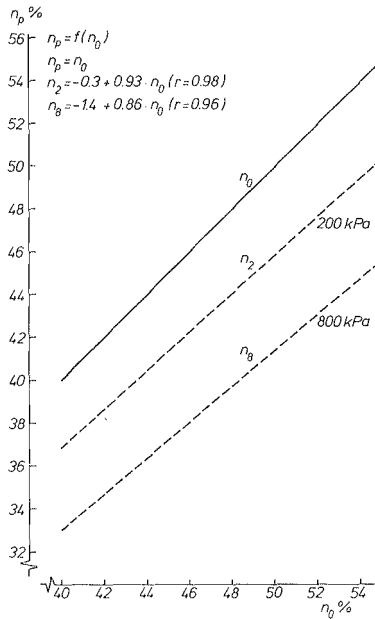
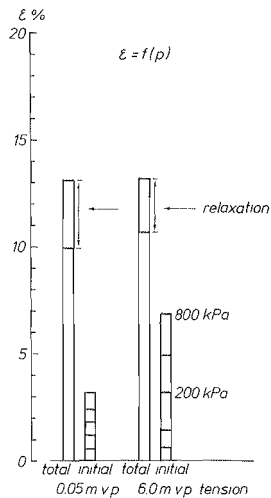
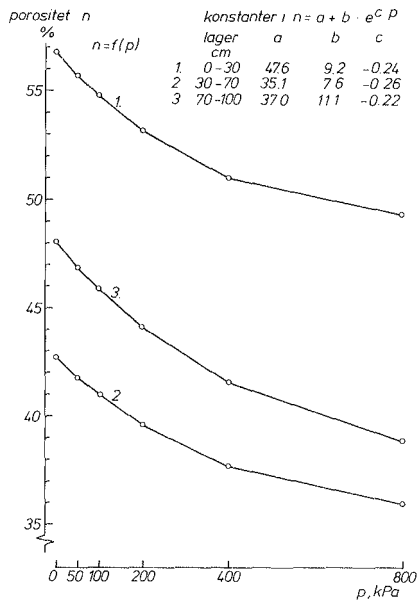
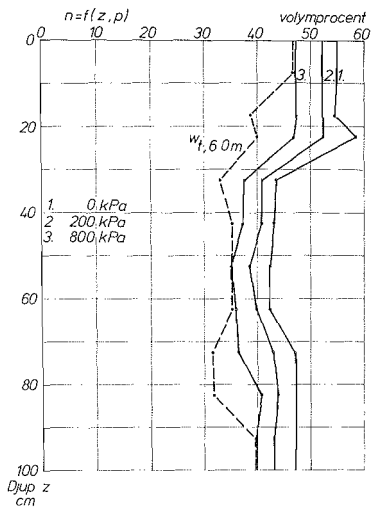


Fig. 5.20. Falkenå, Örebro län. Mekaniska egenskaper. Falkenå, Örebro county. Mechanical properties.

Lager, cm	Mull	Sand	Mo	Mjåla	Ler, %	Jordart enl. NJF
Layer, cm	Humus	Sand	F.sand	Silt	Clay, %	Soil type (NJF)
1. 0-30	8	1	18	31	42	Mellanlera, mr
2. 30-70	-	1	24	31	44	Styv lera
3. 70-100	-	1	29	30	40	Styv lera

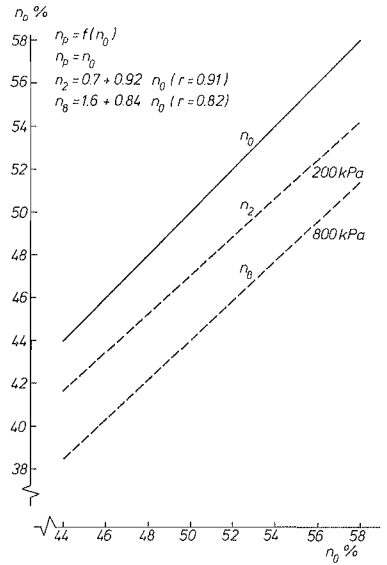
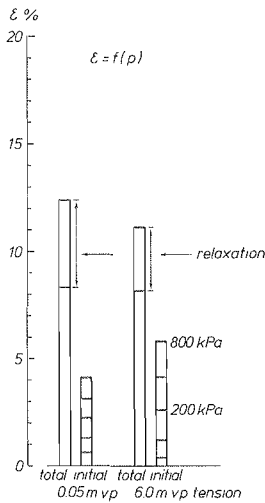
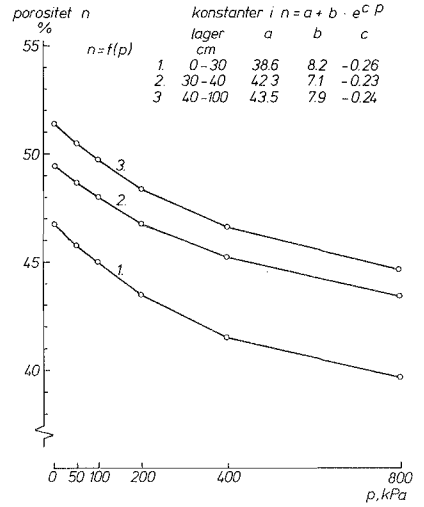
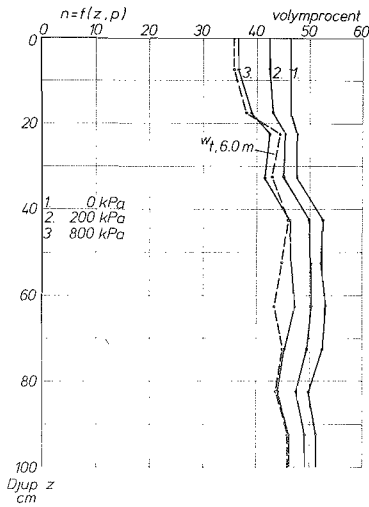


Fig. 5.21. Bengtsbo, Västmanlands län. Mekaniska egenskaper. Bengtsbo, Västmanlands county. Mechanical properties.

Lager, cm	Mull	Sand	Mo	Mjåla	Ler, %	Jordart enl. NJF
Layer, cm	Humus	Sand	F.sand	Silt	Clay, %	Soil type (NJF)
1. 0-30	4	2	15	20	59	Styv lera, mmh
2. 30-40	-	1	1	19	79	Mycket styv lera
3. 40-100	-	1	3	23	73	Mycket styv lera

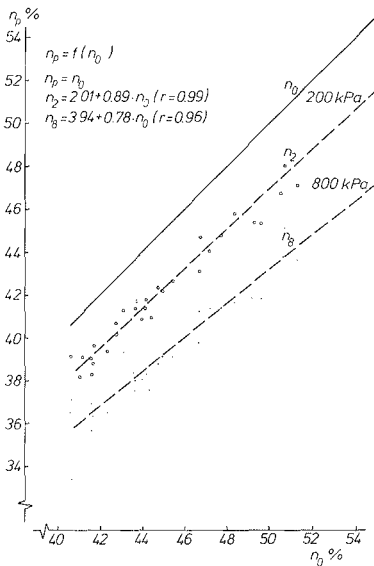
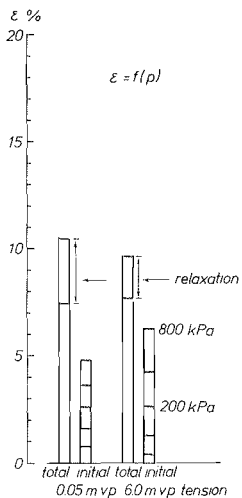
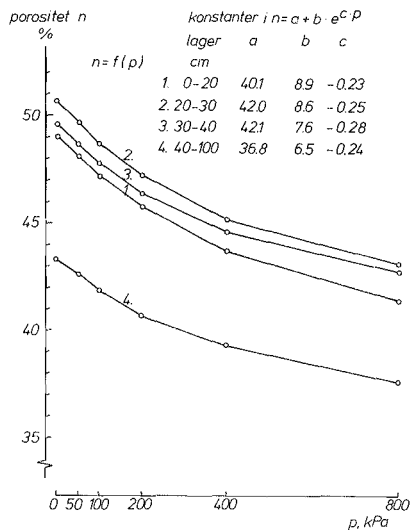
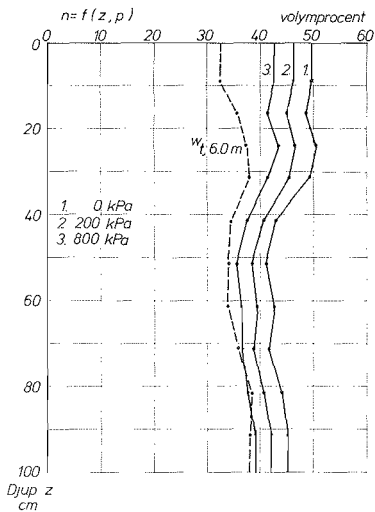


Fig. 5.22. Kloster, Kopparbergs län. Mekaniska egenskaper. Kloster, Kopparbergs county. Mechanical properties.

Lager, cm	Mull	Sand	Mo	Mjåla	Ler, %	Jordart enl. NJF
Layer, cm	Humus	Sand	F.sand	Silt	Clay, %	Soil type (NJF)
1. 0-20	3	2	35	42	18	Mjällera, nmh
2. 20-30	3	5	13	53	26	Mjällera, nmh
3. 30-40	-	4	11	57	28	Mellanlera
4. 40-100	-	1	11	53	35	Mellanlera

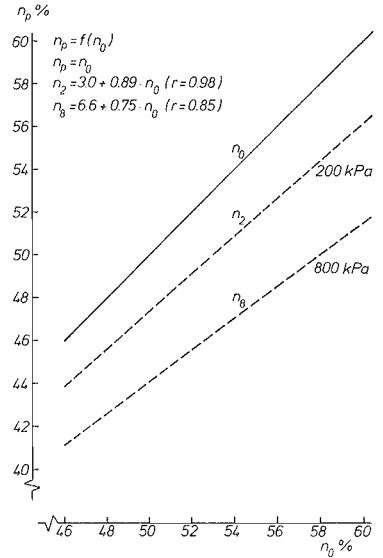
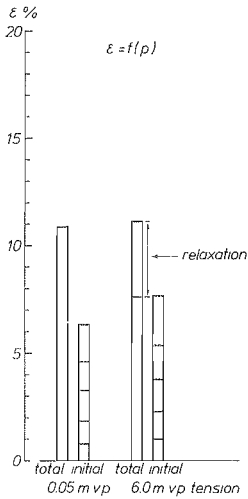
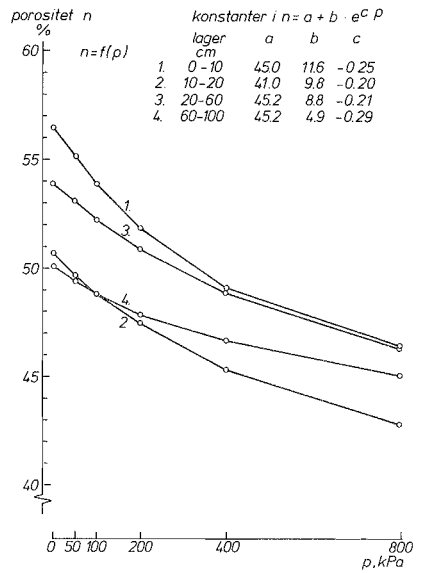
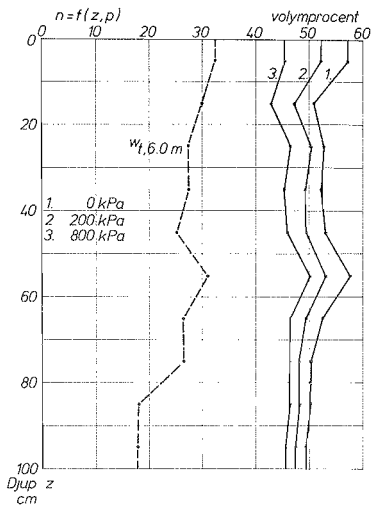


Fig. 5.23. Älvgården, Kopparbergs län. Mekaniska egenskaper. Älvgården, Kopparbergs county. Mechanical properties.

Lager, cm	Mull	Sand	Mo	Mjåla	Ler, %	Jordart enl. NJF
Layer, cm	Humus	Sand	F.sand	Silt	Clay, %	Soil type (NJF)
1. 0-10	4	1	48	35	12	Lerig mo, mmh
2. 10-20	4	1	48	35	12	Lerig mo, mmh
3. 20-60	-	1	48	42	9	Lerig mo
4. 60-100	-	1	71	23	5	Lerig mo

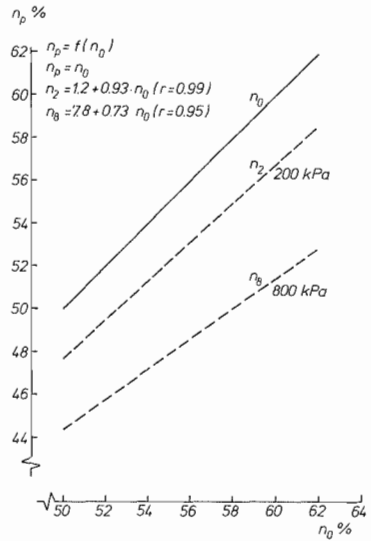
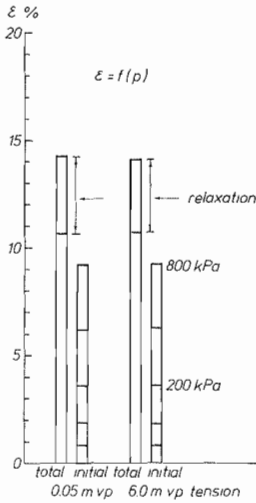
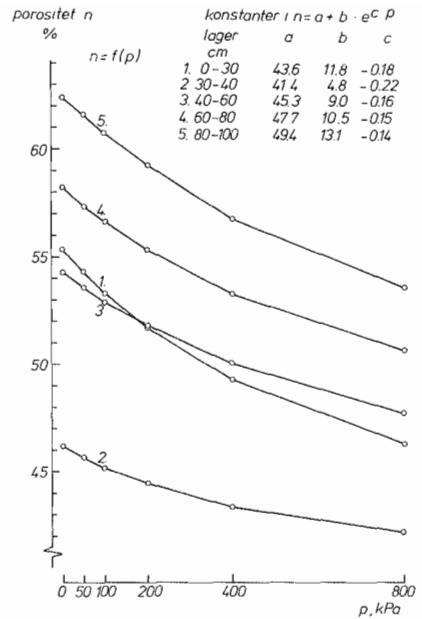
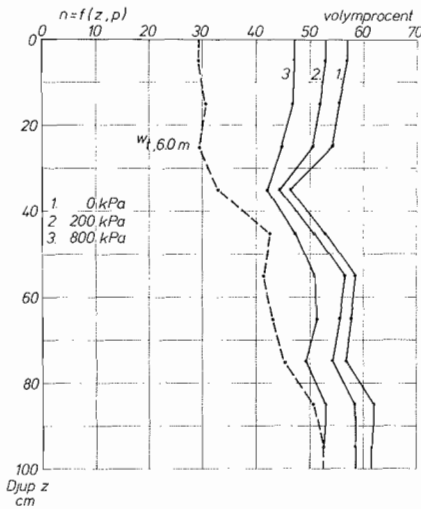


Fig. 5.24. Röbbäcksdalen, Västerbottens län. Mekaniska egenskaper. Röbbäcksdalen, Västerbottens county. Mechanical properties.

Lager, cm	Mull	Sand	Mo	Mjåla	Ler, %	Jordart enl. NJF
Layer, cm	Humus	Sand	F. sand	Silt	Clay, %	Soil type (NJF)
1. 0-30	5	1	68	18	8	Lerig mo, mmh
2. 30-40	-	2	56	34	8	Lerig mo
3. 40-60	-	2	44	44	10	Lerig mo
4. 60-80	-	3	24	61	12	Lerig mjåla
5. 80-100	-	3	27	56	14	Lerig mjåla

Sammanfattning av profilernas mekaniska egenskaper

Av de undersökta profilerna har 3 lerhalter under 25 % och företer friktionskaraktär. Övriga profiler har över 25 % ler, varvid kohesionen blir dominerande. Inom geotekniken används vidare begreppet mellanjordarter för lättleror-mellanleror med intermediär karaktär, dvs. influens av både kohesion och friktion. Deformationsförloppet i en aggregerad jord är ytterligare komplicerat och endast till en del beroende av kohesionen såsom den reodlat framträder i såplereprov. Liksom fallet är inom geotekniken bör begreppen kohesionsjordar, friktionsjordar och mellanjordarter ses som en allmän anvisning om de mekaniska egenskaperna. En av lerprofilerna, Kungsängen är gyttjelera med speciella fysikaliska egenskaper som gör att den bör särbehandlas också beträffande de mekaniska egenskaperna. Vissa lager i andra profiler såsom t.ex. Sätuna, Älvgården och Röbbäcksdalen innehåller också gyttjesubstans och/eller organisk substans som ger hög porositet och en porstorleksfördelning som påverkar de mekaniska egenskaperna.

En sammanställning av profilerna med redovisning av medeltal för homogena lagers lerhalt, porositet och porositetsminskning vid belastning är gjord i tabell 5.2. I fig. 5.25 erhålles en översikt för alven av porositet och av den erhållna deformationen för tryckspänningsintervallet 0-800 kPa med materialet ordnat efter lerhalt. I fig. 5.26 är porvolymminskningen för samma tryckintervall redovisad separat. I samma diagram är också för jämförelse inlagt kurvan för porer $> 5 \mu\text{m}$ i alvjordar från fig. 5.1. Av diagrammen framgår att lerjordar från ca 25 % ler, alltså mellanleror och uppåt, företer en likartad deformationsbild. Porvolymminskningen för lerorna motsvarar i stort den del av markrummet som upptas av grova porer. I detta fall representerad av porgränsen $5 \mu\text{m}$ eller den del av porsystemet som dräneras vid 6,0 m vp. Porvolymminskningen går från ca 9 % i mellanleror till ca 6 % i mycket styva leror.

Variationen är dock stor inom jordartsklasser och även inom så smala intervall som lerklasser. De låga värdena inom området 35-45 % ler i diagrammet fig. 5.26 hänför sig till provplatserna Gammalstorp, Kloster och Falkenå. De har av olika orsaker i förhållande till lerhalten mycket låga utgångs porositeter, i intervallet 40-45 %. Gammalstorp och Kloster har viss varvighet med hög andel grovler i lerfraktionen som ger jorden lättlerokaraktär. Detta visar sig också i andra avseenden såsom i brukningsegenskaper, uppfrysningstendenser m.m. I Falkenåjorden kan förklaringen ligga i kornstorleksfördelningen med utöver ler en koncentration av partiklar i grovmjåla-

finmo som ger ett utpräglat tvåfasset system (Kezdi 1973). Höga värden i porvolymminskning uppvisar å andra sidan Grävstajorden med sin extrema porstorleksfördelning med hög andel grova porer.

För jordar med lerhalter under 25 % blir friktionsegenskaperna bestämmande för deformationen. Den blir därför ganska måttlig även om andelen grova porer är stort. Bland profilerna är Älvgården och Röbbäcksdalen exempel med hög moandel som också ger hög andel grova porer. Vissa lager i dessa profiler har inslag av organisk substans och gyttjesubstans som ger en höjd porositet och påverkar porstorleksfördelningen. Detta ger sig tillkänna också i deformationsegenskaperna. I Uddeholmsprofilen utgör mjälafractionen 70-80 %. Den blir bestämmande för såväl fysikaliska som mekaniska egenskaper. Porositeten är i alven endast omkring 40 %. Andelen grova porer är liten. Friktionskaraktären är mycket uttalad. Porvolymminskningen vid belastning är till följd härav endast omkring 3 %, vilket är det lägsta värdet för de i undersökningen ingående profilerna.

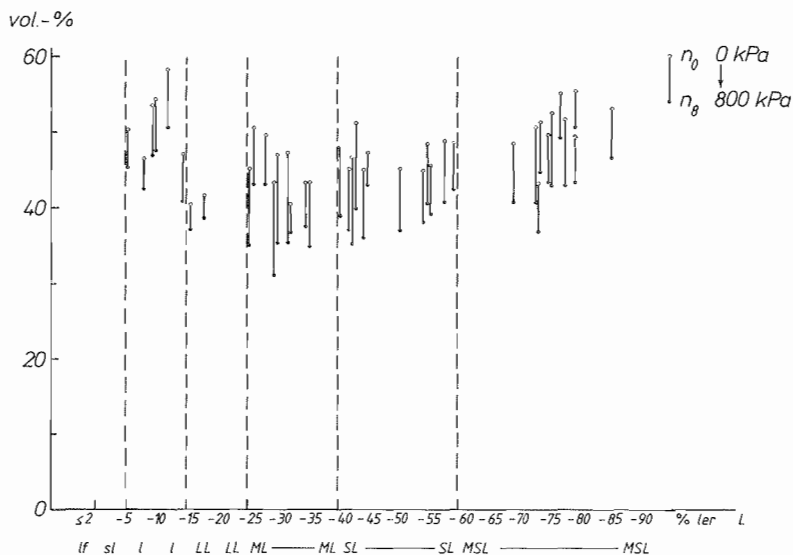


Fig. 5.25. Diagram över sambandet mellan lerhalt och porositet-porositetsminskning vid belastning 0 - 800 kPa.

Relationship between clay content and porosity-reduction in porosity when loaded in the 0-800 kPa range.

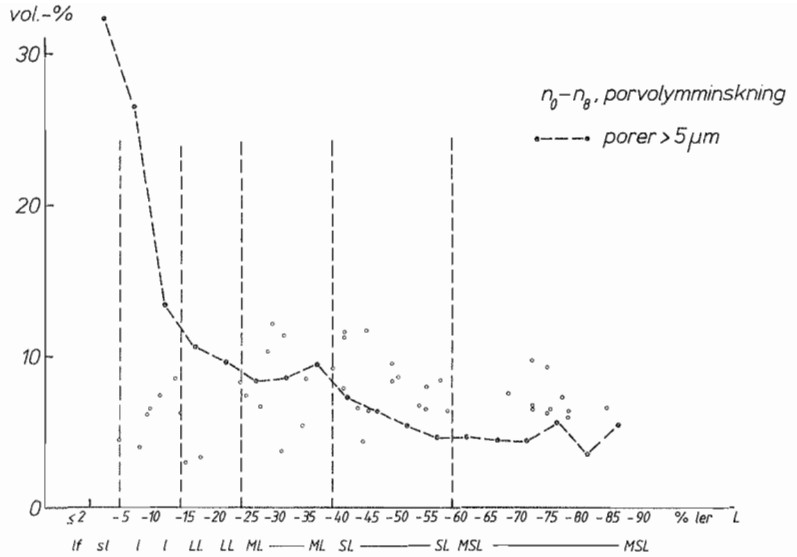


Fig. 5.26. Diagram över sambandet mellan lerhalt och porvolymminskning ($n_0 - n_8$) vid belastning 0 - 800 kPa. Avser alvdelen av undersökta profiler. För jämförelse är också kurvan från fig. 5.2 för porer > 5 μm i alvjordar införd.

Relationship between clay content and reduction in pore volume ($n_0 - n_8$) when subjected to loads in the 0-800 kPa range. Samples of subsoil in the investigated profiles. For comparison, the curve from fig. 5.2 for pores > 5 μm in the subsoil has also been included.

Tabell 5.2. Profilsammanställning med medelvärden för typiska lager över lerhalt, kompaktdensitet (ρ_s), skrymdensitet (ρ_o och ρ_8), porvolym (n_o , n_2 och n_8) samt porvolymsskillnader. (Index 0, 2, 8 = 0, 200, 800 kPa tryck.).

List of profiles with mean values in typical layers for clay content, compact density (ρ_s), bulk density (ρ_o and ρ_8), pore volume (n_o , n_2 , and n_8) and pore volume differences. (Index 0, 2, 8 = 0, 200, 800 kPa pressure.)

Profil Profile	Lager Layer cm	Ler % Clay %	ρ_s	ρ_o	ρ_8	n_o	n_2	n_8	$n_o - n_2$	$n_o - n_8$
Grävsta	0-20	29	2,65	1,30	1,59	49,5	44,9	39,4	4,6	10,1
	20-70	29	2,67	1,50	1,78	43,6	38,8	33,3	4,8	10,3
	70-100	32	2,72	1,44	1,75	47,1	42,0	35,6	5,1	11,5
Skillsta	0-20	42	2,68	1,43	1,66	46,5	42,7	37,7	3,8	8,8
	20-30	42	2,67	1,47	1,68	45,1	42,1	37,1	3,0	8,0
	30-40	76	2,76	1,32	1,58	52,1	48,3	42,8	3,8	9,3
	40-100	73	2,76	1,36	1,62	50,5	46,2	40,6	4,3	9,9
Säby	0-30	24	2,65	1,20	1,45	54,6	50,9	45,3	3,7	9,3
	30-50	25	2,70	1,47	1,70	45,6	42,4	37,2	3,2	8,4
	50-80	30	2,70	1,36	1,67	47,2	42,2	35,1	5,0	12,1
	80-100	46	2,70	1,13	1,44	58,2	53,3	46,3	4,9	11,9
Sätuna	0-30	28	2,61	1,47	1,70	43,5	39,8	34,6	3,7	8,9
	30-40	42	2,64	1,40	1,61	46,8	41,8	35,4	5,0	11,4
	40-80	42	2,69	1,30	1,57	51,6	46,2	40,0	5,4	11,6
	80-100	15	2,66	1,41	1,38	46,9	44,1	40,7	2,8	6,2
Kungsängen (Ultuna)	0-20	46	2,53	0,99	1,27	59,3	54,9	49,5	4,4	9,8
	20-30	46	2,52	0,83	1,02	66,8	63,7	59,2	3,1	7,6
	30-40	50	2,50	0,93	1,14	62,7	59,7	54,1	3,0	8,6
	40-100	50	2,65	0,86	1,11	66,8	63,4	57,1	3,4	9,7
Ultuna	0-20	52	2,65	1,26	1,57	52,2	46,6	40,5	5,6	11,7
	20-30	51	2,70	1,47	1,70	45,6	42,1	36,9	3,5	8,7
	30-100	58	2,75	1,40	1,63	48,9	45,7	40,5	3,4	8,4
Hovgården	0-10	44	2,59	1,33	1,63	48,6	43,3	37,2	5,3	11,4
	10-30	44	2,58	1,54	1,72	40,5	37,6	33,2	2,9	7,3
	30-40	73	2,68	1,52	1,70	43,2	40,4	36,4	2,8	6,8
	40-100	76	2,73	1,37	1,53	49,8	47,2	43,7	2,6	6,1
Häradshammar	0-20	76	2,52	1,07	1,29	57,6	53,7	48,8	3,9	8,8
	20-70	77	2,66	1,18	1,35	55,5	53,0	49,1	2,5	6,4
	70-100	79	2,67	1,13	1,30	57,7	55,1	51,1	2,6	6,6
Lönhult	0-20	32	2,61	1,47	1,71	44,0	39,7	34,6	4,3	9,4
	20-40	36	2,67	1,51	1,73	43,7	39,6	34,9	4,1	8,8
	40-100	69	2,75	1,43	1,64	48,2	44,5	40,5	3,7	7,7
Övragård	20-30	47	2,65	1,37	1,58	48,5	45,0	40,5	3,5	8,0
	30-60	54	2,72	1,50	1,68	44,9	42,0	38,0	2,9	6,9
	60-100	56	2,74	1,49	1,67	45,9	42,8	39,1	3,1	6,8

Profil Profile	Lager Layer cm	Ler % Clay %	ρ_s	ρ_o	ρ_8	n_o	n_2	n_8	$n_o - n_2$	$n_o - n_8$
Gammalstorp	0-30	31	2,58	1,26	1,45	51,1	47,4	43,9	3,7	7,2
	30-40	32	2,70	1,62	1,72	40,2	38,5	36,4	1,7	3,8
	40-100	45	2,71	1,43	1,54	47,3	45,4	43,0	1,9	4,3
Gunnarstorp	0-20	45	2,57	1,26	1,49	51,0	46,5	41,9	4,5	9,1
	20-40	56	2,71	1,39	1,60	48,5	45,2	40,5	3,3	8,0
	40-100	59	2,73	1,41	1,58	48,4	45,9	42,1	2,5	6,3
Vrå Nolgården	0-10	57	2,60	1,09	1,42	57,9	50,4	45,2	7,5	12,7
	10-20	57	2,60	1,29	1,54	50,8	45,7	40,9	5,1	9,9
	20-40	78	2,76	1,38	1,58	49,9	46,5	42,7	3,4	7,2
	40-100	86	2,77	1,28	1,47	53,3	50,2	46,5	3,1	6,8
Uddeholm	0-20	20	2,57	1,51	1,63	40,8	38,9	36,4	1,9	4,4
	20-40	16	2,67	1,60	1,67	40,1	38,7	37,1	1,4	3,0
	40-100	18	2,70	1,56	1,66	41,9	40,3	38,6	1,6	3,3
Falkenä	0-30	42	2,59	1,12	1,32	56,8	53,2	48,9	3,6	7,9
	30-70	44	2,71	1,55	1,74	42,7	39,6	36,0	3,1	6,7
	70-100	40	2,71	1,40	1,65	48,1	44,2	38,9	3,9	9,2
Bengtsbo	0-30	59	2,58	1,37	1,55	46,8	43,5	39,7	3,3	7,1
	30-40	79	2,71	1,37	1,53	49,5	46,8	43,5	2,7	6,0
	40-100	73	2,71	1,32	1,52	51,4	48,4	44,7	3,0	6,7
Kloster	0-20	18	2,61	1,32	1,53	49,0	45,7	41,5	3,3	7,5
	20-30	26	2,66	1,31	1,51	50,7	47,3	43,2	3,4	7,5
	30-40	28	2,70	1,36	1,54	49,6	46,4	42,9	3,2	6,7
	40-100	35	2,73	1,54	1,70	43,3	40,8	37,7	2,5	5,6
Älvgården	0-10	12	2,58	1,12	1,38	56,5	51,9	46,5	4,6	10,0
	10-20	12	2,59	1,28	1,48	50,7	47,5	42,9	3,2	7,8
	20-60	9	2,71	1,19	1,47	53,9	50,9	46,8	3,0	7,1
	60-100	5	2,71	1,35	1,47	50,1	47,9	45,6	2,2	4,5
Röbäcksdalen	0-30	8	2,58	1,15	1,38	55,4	51,8	46,4	3,6	9,0
	30-40	8	2,67	1,44	1,55	46,2	44,5	42,2	1,7	4,0
	40-60	10	2,67	1,22	1,39	54,3	51,8	47,8	2,5	6,5
	60-80	12	2,64	1,10	1,30	58,2	55,4	50,7	2,8	7,5
	80-100	14	2,67	1,00	1,24	62,3	59,3	53,6	3,0	6,7

Sambandet mellan porositet, porstorleksfördelning och porvolymminskning vid belastning

I denna översikt av jordprofilerna för att belysa i rubriken angivna samband redovisas materialet i jordartsgrupper. I ett stapeldiagram för varje provplats, fig. 5.27 t.o.m. 5.30, anges dels porositet och porstorleksfördelning dels porositetsminskningen vid belastning. Man erhåller i den första stapeln av diagrammet en bild av markrummet och hur stor andel av detta som håller växttillgängligt vatten (0-150 m vp). Även fördelningen av detta vatten på olika porstorlekar anges. I den andra stapeln anges hur stor del av markrummet som deformeras under yttre påkänningar. De redovisade värdena är medeltal för alven eller för typiskt lager i alven av de undersökta profilerna. Porositet och porstorleksfördelning är tagna ur redovisade data i "Markfysikaliska undersökningar i odlad jord" (Andersson och Wiklert 1960, 1972 m.fl.). Dessutom har i samband med de markmekaniska undersökningarna bindningskurvan blivit fastställd till 6 m vp. I en del profiler har överensstämmelsen mellan fysikaliska data från de två undersökningstillfällena varit mindre god. Medeltalsbildningen har i vissa profiler inneburit svårigheter på grund av stor variation mellan lager. Den givna porstorleksfördelningen kan dock betraktas vara väl representativ för betraktat lager av profilen. Redovisningsformen har valts för att ange vissa huvuddrag i de rubricerade sambanden.

Leriga jordar, lättleror och lättare mellanleror. I fig. 5.27 har grupperats 6 av de undersökta profilerna varav 3 med tydlig friktionskaraktär och 3 mellanjordarter. I Älvgården, Röbbäcksdalen och Uddeholm är huvuddelen av porvolymen porer större än $0,2 \mu\text{m}$ som kan hålla markvattnet växttillgängligt. I mojordarna, Älvgården, Röbbäcksdalen, är andelen porer $> 5 \mu\text{m}$ avsevärd. Med påkänningar intill 800 kPa deformeras endast en liten del av totala markrummet och av det grova porsystemet. I mjälaprofilen, Uddeholm, är andelen grova porer ($> 5 \mu\text{m}$) liten. Deformationen av markrummet motsvarar ungefär denna del.

Av de tre mellanlerorna har Grävsta en för leror egenartad porstorleksfördelning. Orsakerna härtill är inte helt klarlagda. Här kan pekas på den förhållandevis höga moandelen. Vidare tyder den låga vissningsgränsen på att leret är av grov karaktär. Den speciella porstorleksfördelningen med porer jämnt fördelade på porklasserna har visat sig vara av värde i principiella studier av markmekaniska egenskaper, t.ex. av olika porers hållfasthet. Jfr kap. 6. Av diagrammet framgår att totala deformationen är hög

men att den motsvarar ändå endast hälften av det grova porsystemet ($> 5 \mu\text{m}$). Säby är en molera med en till lerhalten normal porositet och vissningsgräns. Den höga mohalten ger hög andel grova porer ($> 5 \mu\text{m}$). Porvolymminskningen är av ungefär samma storleksordning som volymandelen grova porer. Kloster har av tidigare nämnda orsaker en låg porositet. Andelen grova porer är dock relativt högt med en kongruent deformation.

Styva leror. Av de undersökta profilerna kan 6 hänföras till styva leror, varav 3 ligger i intervallet 40-50 % ler och 3 i intervallet 50-60 % ler. Med ökad lerhalt stiger vissningsgränsen. Andelen växttillgängligt vatten i markrummet krymper därmed. Särskilt liten blir mängden växttillgängligt vatten i profiler som av skilda orsaker också har låg porositet såsom Falckenå och Gammalstorp. Andelen grova porer ($> 5 \mu\text{m}$) är ganska likartad i de undersökta lerprofilerna utom i Sätuna som är en svämpera med organogent inslag i profilen. Den porvolymminskning som erhållits i profilerna motsvarar ungefär det grova porsystemet. Att märka är också att minskningen inkräktar på 1/3 till 1/2 av den del av markrummet som kan hålla växttillgängligt vatten.

Mycket styva leror. Av de undersökta profilerna har 6 en lerhalt över 60 % och kan hänföras till mycket styva leror. Med ökad lerhalt minskar andelen växttillgängligt vatten successivt. Bland de ingående profilerna är Bengtsbo och Vrå Nolgården mest typiska för mellansvenska lerjordsområdena med mycket små mängder växttillgängligt vatten. Häradshammar utgör en motsatt ytterlighet i gruppen, med hög porositet och därmed relativt stor andel växttillgängligt vatten. Orsaken härtill är inte klarlagd, men kan bero på gyttjeinslag. Av de övriga profilerna representerar Skillsta de godartade kalkrika östsvenska lerorna. Lönhult och Hovgården ligger i anslutning till silurmorän i Skåne resp. Östergötland. De har trots låg porositet en relativt hög andel tillgängligt vatten. Porositetsminskningen vid belastning med 800 kPa motsvarar i samtliga profiler ungefär volymen av det grova porsystemet ($> 5 \mu\text{m}$). Minskningen utgör ungefär hälften av markrummet med växttillgängligt vatten utom i anomalien Häradshammar.

Gyttjeleror. Kungsängen med 50 % ler redovisas på grund av gyttjeinslaget separat. Gyttjan ger som framgår av fig. 5.30 en hög porositet och till följd härav hög andel växttillgängligt vatten. Strukturen som på den undersökta nån är påverkad av såväl upptorkning som tjäle har en mycket grymig karaktär. Detta ger ett makroporsystem med hög andel grova porer, såsom framgår av diagrammet. Detta deformeras endast delvis av påkänningar intill 800 kPa.

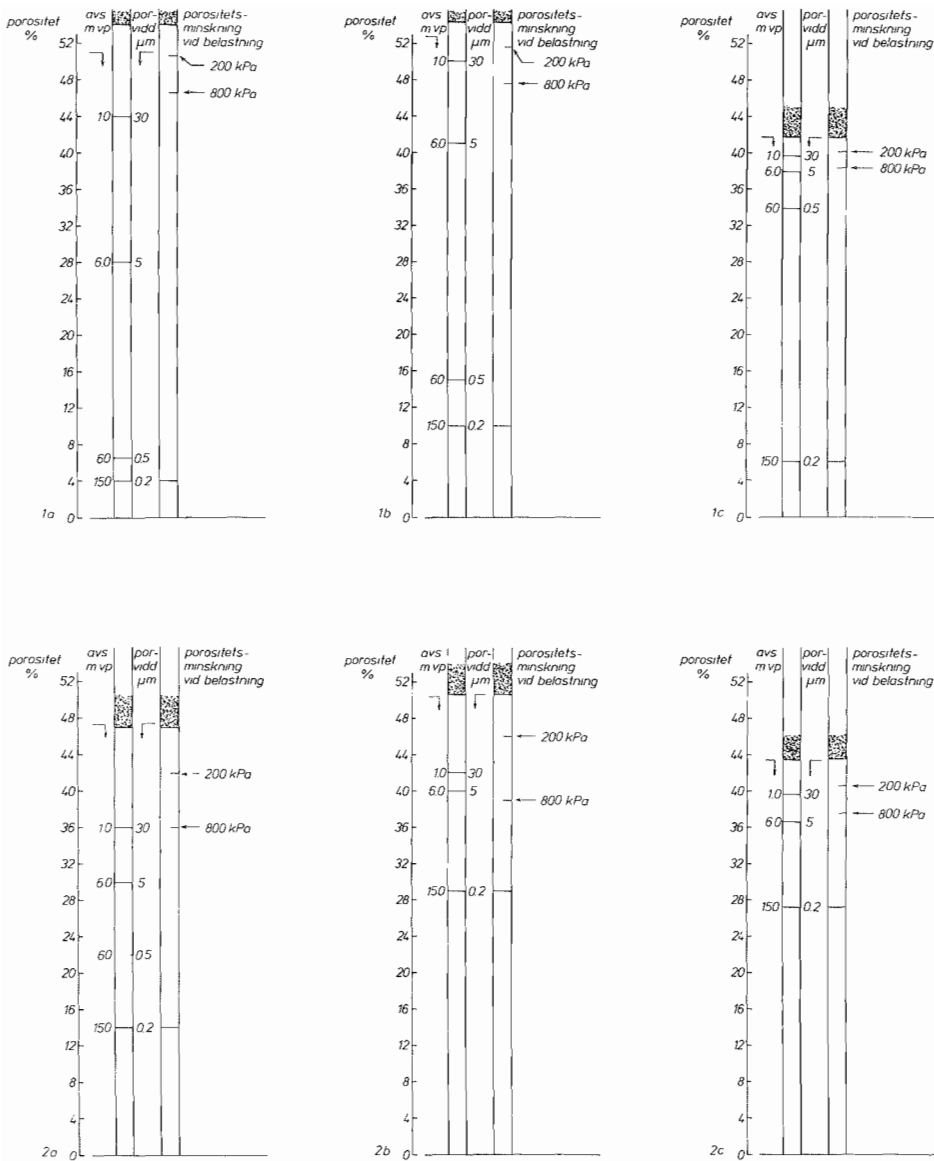


Fig. 5.27. Samband mellan porositet, porstorleksfördelning och porositetsminskning vid belastning.

Relationship between porosity, pore size distribution and reduction in porosity when loaded.

- 1) Leriga jordar: a. Älvgården 20-60 cm, 9 % ler. b. Röbbäcksdalen 40-60 cm, 10 % ler, c. Uddeholm 40-100 cm, 18 % ler.
- 2) Mellanleror: a. Grävsta 20-70 cm, 29 % ler, b. Säby 40-100 cm, 30 % ler, c. Kloster 40-100 cm, 35 % ler.

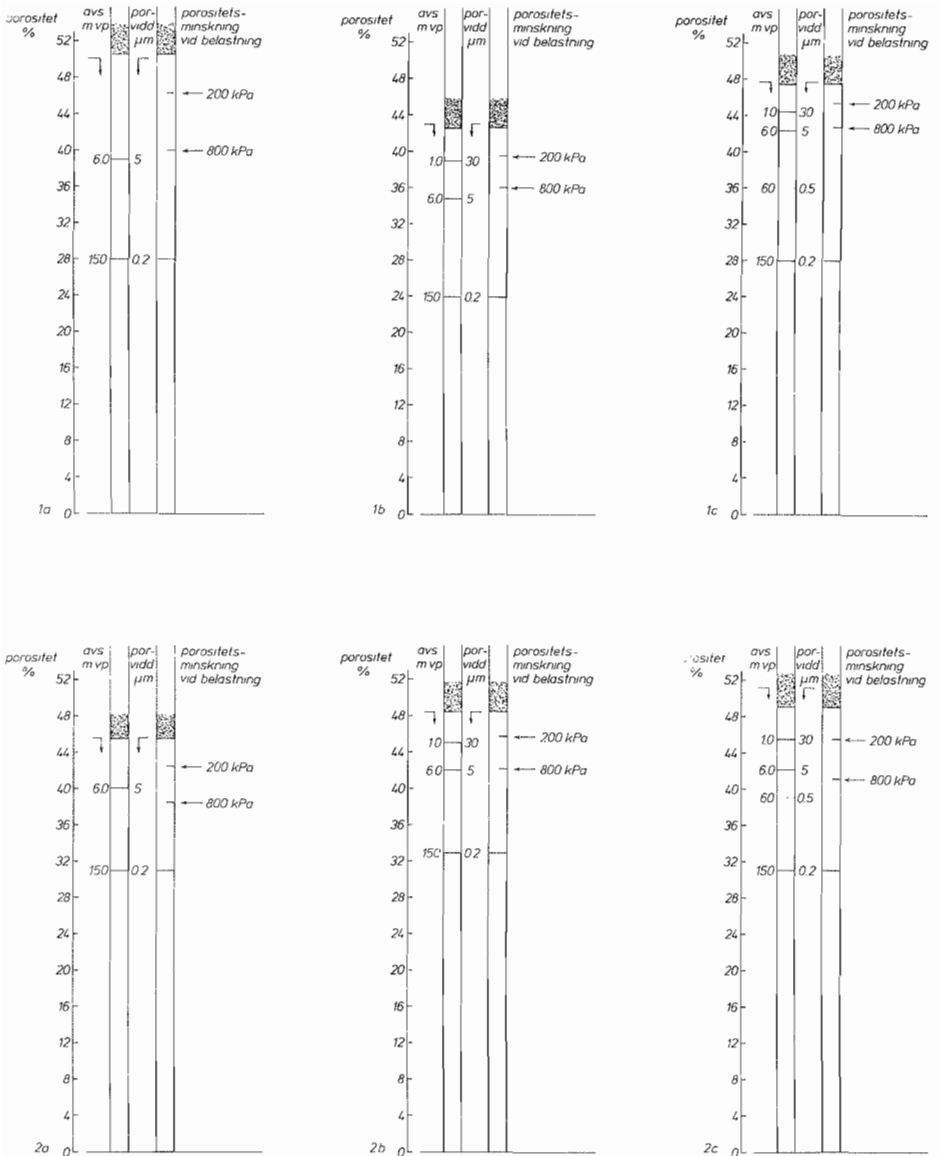


Fig. 5.28. Samband mellan porositet, porstorleksfördelning och porositetsminskning vid belastning.

Relationship between porosity, pore size distribution and reduction in porosity when loaded.

- 1) Styva leror (40-50 % ler): a. Sätuna 40-80 cm, 42 % ler, b. Falkenä 30-70 cm, 44 % ler, c. Gammalstorp 40-100 cm, 45 % ler.
- 2) Styva leror (50-60 % ler): a. Övragård 30-60 cm, 54 % ler, b. Gunnars-torp 40-100 cm, 59 % ler, c. Ultuna 30-100 cm, 58 % ler.

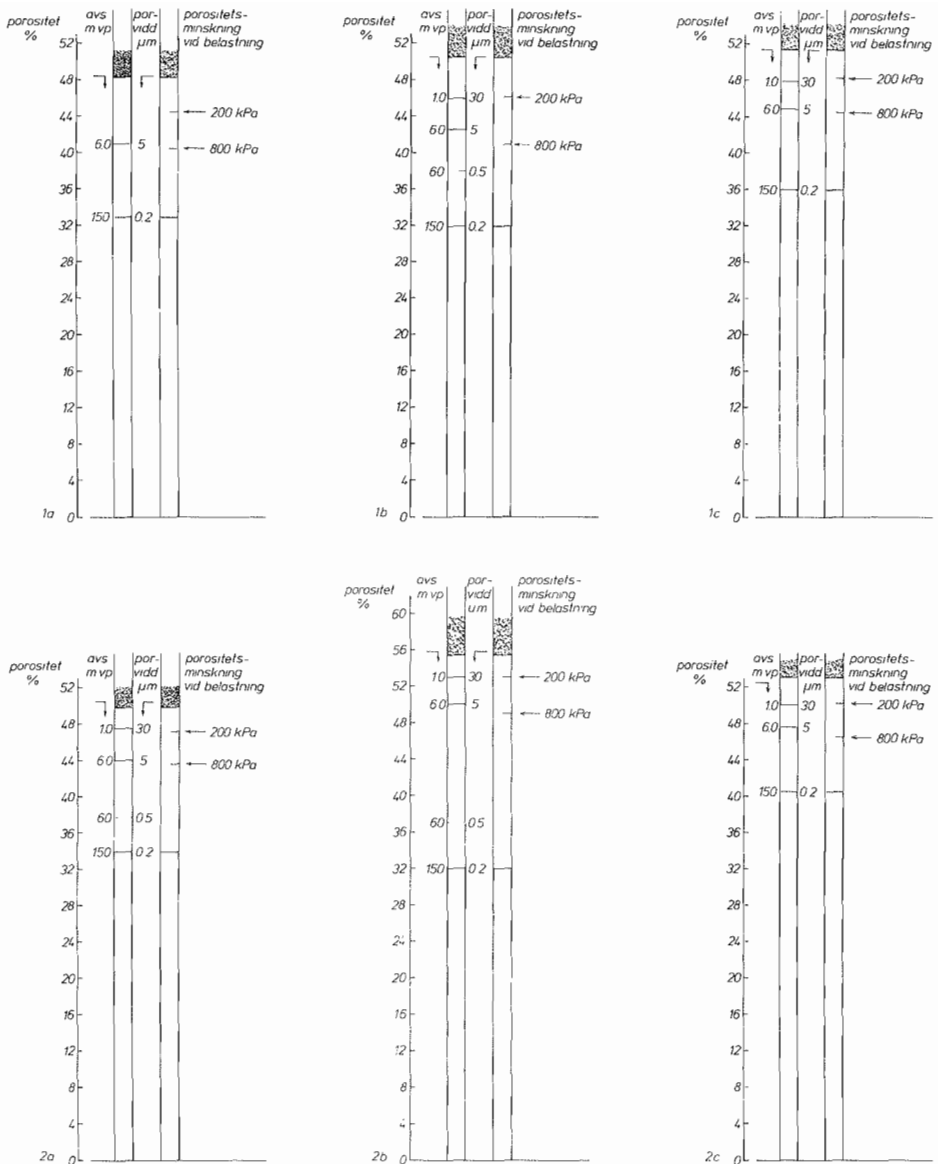


Fig. 5.29. Samband mellan porositet, porstorleksfördelning och porositetsminskning vid belastning.

Relationship between porosity, pore size distribution and reduction in porosity when loaded.

- 1) Mycket styva leror (60-70 % ler): a. Lönhult 40-100 cm, 69 % ler, b. Skillsta 40-100 cm, 73 % ler, c. Bengtsbo 40-100 cm, 73 % ler.
- 2) Mycket styva leror (70-90 % ler): a. Hovgården 40-100 cm, 76 % ler, b. Häradshammar 20-70 cm, 77 % ler, c. Vrå Nolgården 40-100 cm, 86 % ler.

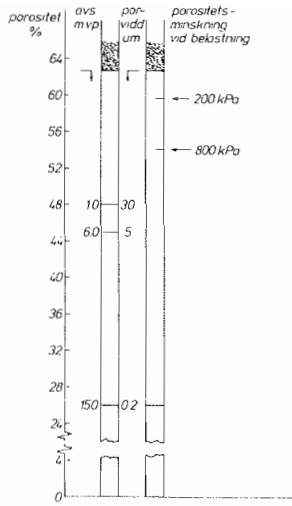


Fig. 5.30. Samband mellan porositet, porstorleksfördelning och porositetsminskning vid belastning.

Relationship between porosity, pore size distribution and reduction in porosity when loaded.

Gyttjelera: Kungsängen 40-50 cm, 50 % ler.

Endast få data finns tillgängliga för naturligt lagrad jord som visar hur packning påverkar porstorleksfördelningen. Viss belysning av frågan har erhållits i undersökningar av bl.a. Sommer et al. (1972), Eriksson et al. (1974), Danfors (1974), Soane (1975), Eriksson (1975/76). En litteraturoversikt med summering av känd kunskap över bl.a. denna problemställning har gjorts av Greenland (1977) och av Soane et al. (1980/81). Nämnade symposier dels Symposium on Subsoil Compaction, Uppsala, september 1980 och EEC Seminar on Soil Degradation, oktober 1980 har behandlat bl.a. denna delaspekt av markpackningen. Genomgående uttrycks farhågor att ett intensivare utnyttjande av markresurserna som bl.a. innebär högre mekaniska påkänningar, medför en markförsämring med negativa effekter på markens funktion och på skörd. Markförändringen begränsas inte enbart till matjorden utan når under de stora maskinvikterna också alven. I det framtida arbetet betonas behovet av undersökningar rörande den fysikaliska processen involverad i markförsämringen. Sådana studier är en förutsättning för bättre förståelse också av markinfluenser till följd av tung körning. Med insikt om vilka delar av porsystemet som påverkas kan också riktade studier av regenereringsprocessen efter packning tas upp.

Egna undersökningar

I detta avsnitt redovisas ett antal egna undersökningar som belyser hur porsystemet i naturligt lagrad jord påverkas vid trycktillskott. Jordelement har bringats till olika packning antingen i kompressometer efter uttagningen ur profilen eller in situ i profilen genom ytlaster före uttagningen. I det senare fallet har såväl storleken som frekvensen av trycktillskotten varit starkt varierande. Fältundersökningar efter in situ packning har gjorts på platser där påkänningarna i marken dock grovt kan hänföras till tre intensitetsnivåer: hög, normal och låg. Den högsta nivån av påkänningar i fält hänför sig till en undersökning av extrem tung körning under lång tid (30 år) med stridsvagnar och andra tunga fordon på lerjord inom ett militärt övningsområde (Eriksson 1975/76). En normal nivå och en låg nivå av påkänningar har erhållits i två långliggande fältförsök de s.k. vinschningsförsöken i Skaraborgs län (Olvegård 1965). Den låga nivån av påkänningar i dessa försök har erhållits på rutor där arbetsoperationerna vid jordbearbetning utförts genom vinschning, den normala nivån genom traktordrift med medeltung traktor. Undersökningen av porstorleksfördelningen i dessa fall utfördes efter 7-10 års bruk, varför varaktigheten i de prövade bruksformerna

varit sådan att ett jämviktstillstånd får anses ha inträtt i profilen.

Undersökning av porstorleksfördelning efter belastning i kompressometer

Undersökningen omfattar bestämning av porvolym och porstorleksfördelning före och efter packning i kompressometer. Den har utförts på jord i naturlig lagring dels från Grävsta dels från Sätuna, Uppsala län. Beträffande markegenskaper hänvisas till profilredovisningen sid. 43 och 46.

Grävsta, Uppsala län. Undersökningen utfördes på provproppar uttagna i alven på ett djup av 40-42,5 cm. Lerhalten på detta djup är ca 30 %. Strukturen är välutvecklad med omkring 10 % porer större än 30 μm , som töms vid en dränering av 1,0 m. Vid 0,05 m dränering utsattes propparna för trycktillskott i de standardiserade stegen 0, 50, 100, 200, 400 och 800 kPa med fyra parallellprov i varje steg. Porstorleksfördelningen före och efter påckning härleddes ur bindningskurvor bestämda genom avsugning. Reproducerbarheten i avsugningstekniken har behandlats bl.a. av Hall et al. (1977) och Ledin (1981). Porsystemet vars egenskaper skall mätas förändras i viss utsträckning genom krympningen då vattnet dras ut. Hall et al. konstaterar dock vid granskning av ett stort material från engelska fastmarksjordar att avsugning ger acceptabla värden på det grövre porsystemet. I jordar med låg lerhalt och låg krympning kan också det finare porsystemet mätas. Metoden har fördelen att stora prover användbara för andra bestämningar kan användas och att inga omfattande förbehandlingar måste göras. Detta innebär möjligheter till praktiska jämförelser i makroskala mellan olika jordar eller mellan olika behandlingar av en och samma jord.

Resultaten av Grävsta-undersökningen har tidigare översiktligt redovisats (Eriksson et al. 1974) enl. fig. 6.1a. Diagrammet redovisar situationen efter tryckning. Provet har också haft tillfälle att relaxera dvs. återfjädra. Porositeten minskar med stigande trycktillskott från 44,4 % i utgångsläget till 30,0 % i det sista trycksteget (800 kPa) före relaxation och 36,6 % efter relaxation. Under sammanpressningen förändras också porstorleksfördelningen; i första hand berörs det grövre porsystemet. Före relaxationen är dessutom markrummet avsevärt deformerat utöver det redovisade framförallt i de högre tryckstegen. Provets återfjädring (relaxation) hänförs till mineralpartiklarnas elasticitet, vattenhöljens elastiska deformation och till sammanpressning av luftbubblor. Såväl krympningen genom avsugning som den återfjädrade deformationen ger en svårbedömbare påverkan av markrummet. En detaljgranskning av packningseffekten får med hänsyn härtill och till den använda metodiken be-

gränsas till det grova porsystemet. I fig. 6.1b redovisas för Grävstajorden porandelen större än $3,75 \mu\text{m}$, dvs. de porer som töms vid $8,0 \text{ m vp}$. I den o-packade jorden upptar denna porandel 17 % varav 10 % större än $60 \mu\text{m}$. I tryckstegen 50 och 100 kPa sker en viss minskning av porerna större än $60 \mu\text{m}$ med en omfördelning till porer i intervallet $7,5-60 \mu\text{m}$. I trycksteget upp till 200 kPa inträder en drastisk minskning av hela porandelen över $3,75 \mu\text{m}$. Det är framförallt porer större än $30 \mu\text{m}$ som minskar men även porer i intervallet $3,75-30 \mu\text{m}$ påverkas. I tryckstegen 400 och 800 kPa fortsätter minskningen jämnt fördelad på de olika porgrupperna. Denna detaljgranskning av deformationen visar att de olika porgrupperna tycks gå mot vissa minimivärden. Inom det prövade tryckintervallet pressas således inte de grova porerna helt samman, utan det finns rester av samtliga porer kvar även efter det högsta trycksteget. Såsom jämförande studier över bl.a. luftgenomsläppligheten visar är dock kontinuiteten i det kvarvarande porsystemet starkt försämrade.

Sätuna, Uppsala län. Undersökningen utfördes i samband med belastningsförsök ingående i en studie av Danfors (1974). Fältet ligger intill Uppsalaåsen och utgör en del av ett svämlereområde. Till följd av bildningssättet är det en stark variation av jordart med djupet. Lerinnehållet är 30 % i matjorden och 40-50 % i centrala delen av alven. I botten på profilen (80-100 cm) finns lager med sand. Med variation i jordart följer en stark variation i de fysikaliska och mekaniska egenskaperna. Jfr sid. 46. Provpplatsen erbjuder en möjlighet till jämförelse av både in situ packning och kompressometerpackning. I det syftet uttogs en profil på dels obelastad dels belastad mark. Den belastade marken erhöles inom ett försöksled där ett fordon med 10 ton på enkel axel gjort 9 överfarter. Hjulen var försedda med 40 cm breda däck med 400 kPa innertryck. Provtagningen gjordes med 2,5 cm cylindrar i varje 10 cm lager till 1,0 m djup med 2 paralleller i varje nivå. Porfördelningen undersöktes före och efter packning genom avsugning. Proverna packades i kompressometer i de standardiserade stegen till 800 kPa vid en avsugning av $0,05 \text{ m vp}$.

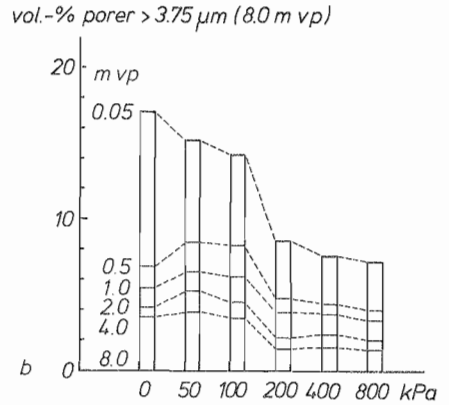
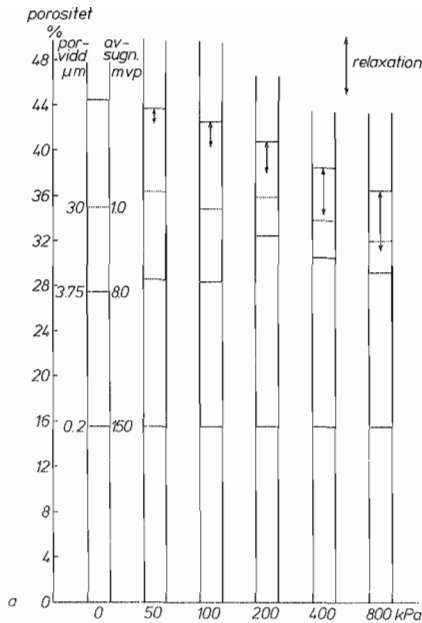


Fig. 6.1a. Förändring i porvolym och porstorleksfördelning vid stigande trycktillskott. Grävsta, Uppsala län, horisont 40,0-42,5 cm välaggregerad lerjord, lerhalt 30-40 %.

Alterations to the pore volume and pore size distribution with increasing pressure applied. Grävsta, Uppsala county, horizon 40.0-42.5 cm well-aggregated clay soil, clay content 30-40 %.

Fig. 6.1b. Förändring i det grova porsystemet, porer > 3,75 µm, vid stigande trycktillskott. Grävsta, Uppsala län, horisont 40,0-42,5 cm, välaggregerad lerjord, lerhalt 30-40 %.

Alterations to the macro-pore system, pores > 3.75 µm with increasing pressure applied. Grävsta, Uppsala county, horizon 40.0-42.5 cm, well-aggregated clay soil, clay content 30-40 %.

Packningsinfluens i Sätunaprofilen. Medelporositeten i den obelastade profilen var 47,7 % och i den belastade 45,4 %, en skillnad av 2,5 %. Av fig. 6.2a framgår porvolymens fördelning med djupet i belastad och obelastad profil. På djupet 60-70 cm synes influensen av ytlasten upphöra och porvolymkurvorna löper samman. Ned till detta djup är porvolymen i "Sätuna, obelastad" 47,6 % och i "Sätuna belastad", 43,9 %, en skillnad av 3,7 %. I likhet med Grävsta är det i första hand de grövre porerna i porsystemet som deformationeras. I diagrammet fig. 6.2b jämföres porer större än 3,75 µm i de två försöksleden, dvs. porer som töms vid ett vattenavförande tryck av 8 m vp. Den

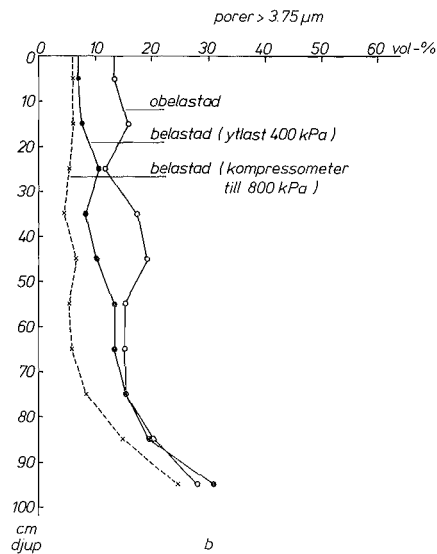
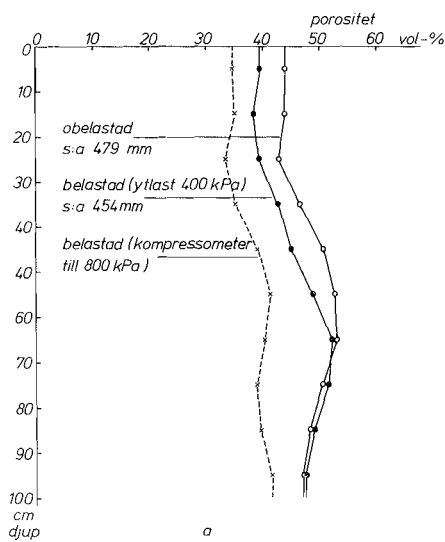


Fig. 6.2a. Sätuna, Uppsala län. Jämförelse av totala porvolymen i obelastad och belastad profil (ytlast 400 kPa). Därför är inlagd den porvolym som profilens olika horisonter vill inta vid extremlasten 800 kPa i kompressometer.

Sätuna, Uppsala county. Comparison of the total pore volume in unloaded and loaded profile (surface load 400 kPa). The pore volumes of the different horizons when maximally loaded at 800 kPa in the compressor are also given.

Fig. 6.2b. Sätuna, Uppsala län. Jämförelse av porer större än 3,75 µm (mot-svarande 8 m vp) i obelastad profil, i belastad profil (ytlast 400 kPa) och i uttagna profilprover efter belastning i kompressometer med 800 kPa.

Sätuna, Uppsala county. Comparison of pores larger than 3,75 µm (corresponding to 8 m wc) in an unloaded profile, in a loaded profile (surface load 400 kPa) and in profile samples removed following loading in the compressor at 800 kPa.

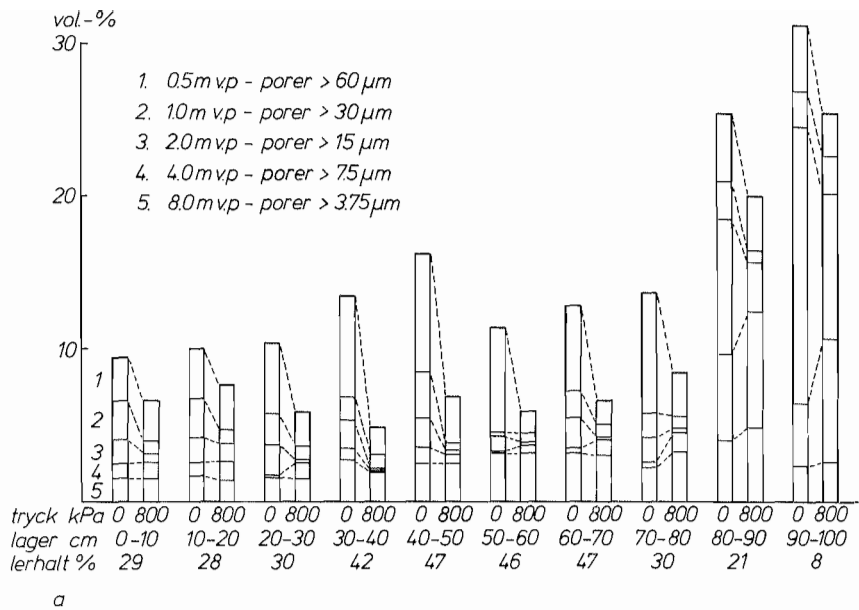
porandel omfattar ned till 70 cm djup i "Sätuna obelastad" 14,4 % och i "Sätuna belastad" 11,0%. Skillnaden, 3,4 %, har samma storleksordning som den totala porvolymens minskning inom denna profildel. Av diagrammet framgår också att i nivån 20-30 cm dvs. plogsulelagret finns ett minimum av grova porer. I fig. 6.2b är vidare inlagd en kurva som visar porandelen > 3,75 µm efter belastning av provproppen med 800 kPa i kompressometer. Oavsett utgångsläget, belastat eller obelastat, har deformationen av de grövre porerna gått till ungefär samma läge. I profildelen 0-70 cm finns en rest av i genomsnitt 6 vol.-% porer > 3,75 µm efter 800 kPa påkänning på propparna.

En detaljerad beskrivning av det grova porsystemets deformation vid ett pålagt tryck av 800 kPa i kompressometer ges i fig. 6.3a och b: Sätuna obelastad resp. belastad profil (i fält). För de olika nivåerna är lerhalten angiven. Som framgår av diagrammen varierar andelen grova porer starkt med texturen. I profildelen till 80 cm med lerhalter högre än 30 % deformeras det grova porsystemet avsevärt, i nivån 20-50 cm i genomsnitt en halvering. Den största minskningen hänförs till porer större än $7,5 \mu\text{m}$, medan pormängden i intervallet $3,75-7,5 \mu\text{m}$ är konstant eller t.o.m. ökar. Det senare innebär att det skett en omfördelning av porer från ett högre porintervall till ett lägre. Den största absoluta minskningen hänförs till genomsnittligt sett till porandelen $> 15 \mu\text{m}$. I Sätunaproverna har således i princip samma förändringar vid packning skett som i Grävstafallet.

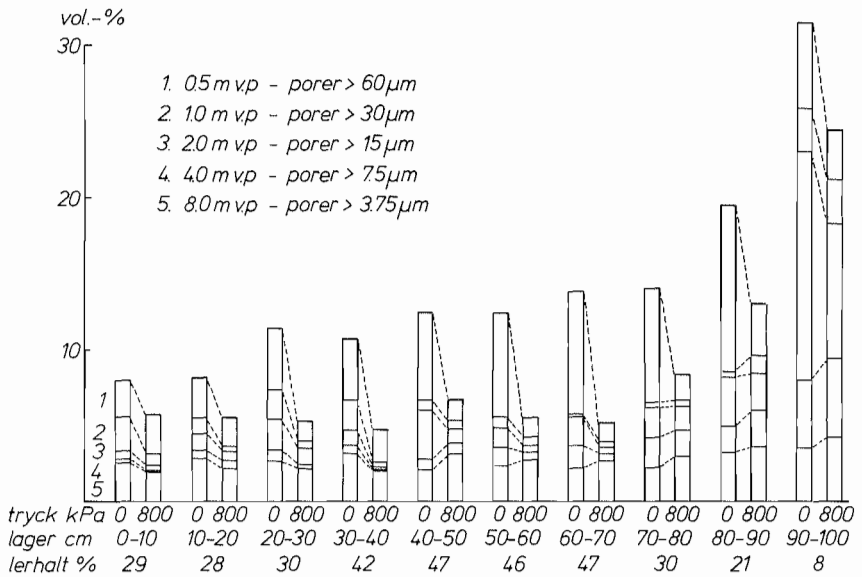
Jämförelse av beräknad och uppmätt packningsgrad i Sätunaprofilen. En av de första ansatserna att belysa packningen under hjullaster gjordes av Söhne (1953). Han visade att packningsinflansen från en ytlast kan beräknas med kännedom om dels tryckfördelningen i profilen under en definierad ytlast dels packningsbenägenheten i markprofilens olika lager. På senare tid har liknande förfaranden att förutsäga packning i främst matjordsdelen av en profil prövats bl.a. av Blackwell och Soane (1981) och av Gupta och Larsson (1982). Föreliggande studie av packningsbenägenheten har utsträckts till att behandla också alvdelen av profilen.

I följande exempel belyses detta med en jämförelse av beräknad och uppmätt packningsgrad i Sätunaprofilen. I det valda försöksledet utgjorde hjullasten 5 ton på 40 cm breda däck. Antal överfarter var 9. I fig. 6.4a anges tryckfördelningen under den nämnda ytlasten. Den angivna spänningsfördelningen är beräknad enligt anvisningar i Eriksson (1974). Dessa anvisningar är i sin tur baserade på Janbu (1970), där en förenklad teori över tryckavlänkning i jord ges. Beräkningssättet skiljer sig från Söhnes (1953), som utgör en modifiering av Boussinesq teori för elastiskt medium att gälla även jord med olika grad av plastisk deformation. De båda beräkningssätten ger dock i stort samma bild av tryckfördelningen.

Tryckfördelningen är schematisk utan hänsynstagande till den anisotropi som föreligger dels mellan matjord och alv dels för olika lager i alven. Den verkliga tryckfördelningen torde dock ligga i det intervall som angivits i diagrammet. I ett andra steg av beräkningsgången granskas deformationen i olika lager till följd av de trycktillskott som de erhåller från ytlasten.



a



b

Fig. 6.3a och b. Sätuna, Uppsala län, a) i fält belastad, b) i fält obelastad profil. Detaljundersökning av det grova porsystemets (porer > 3,75 μ m) förändring vid trycktillskott av 800 kPa i kompressometer.

Sätuna, Uppsala county, loaded and unloaded profiles. Investigation of the alteration to the macro pore system (pores > 3.75 μ m) at loads of 800 kPa in the compressometer.

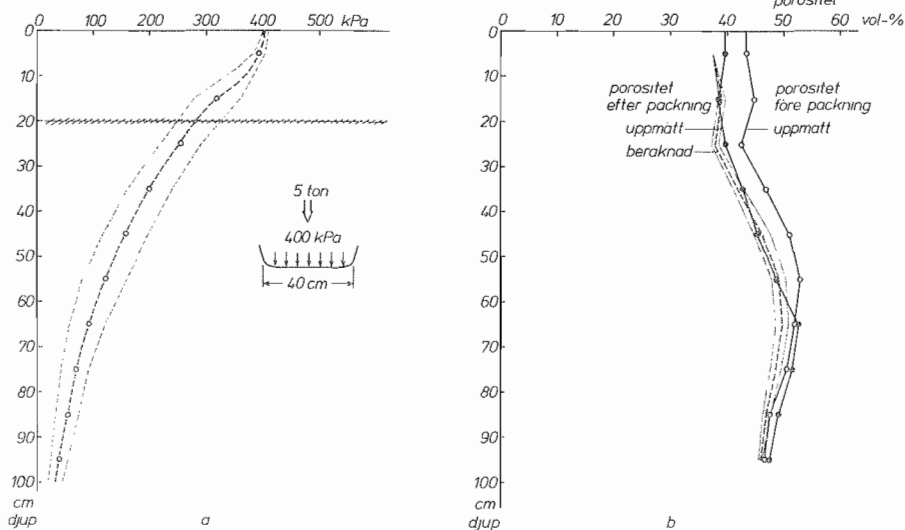


Fig. 6.4a. Sätuna, Uppsala län. Beräknad tryckfördelning under 5 tons hjul-
last. Däcksbredd 40 cm, yttryck 400 kPa (enl. Eriksson 1975/76).

Sätuna, Uppsala county. Predicted pressure distribution under a 5-tonne
wheel load. Tyre width 40 cm, surface pressure 400 kPa (acc. to Eriksson
1975/76).

Fig. 6.4b. Sätuna, Uppsala län. Porvolym i belastad och obelastad profil
samt beräknad porvolym med ledning av trycktillskott enl. fig. 6.4a och
packningsbenägenhet enl. kompressometermätningar.

Sätuna, Uppsala county. Pore volume in loaded and unloaded profile and pre-
dicted pore volume on the basis of applied pressure according to Fig. 6.4a
and compaction vulnerability according to the compressometer measurements.

Därvid har sambandet mellan trycktillskott och resterande porvolym för den
obelastade profilen använts (tab. 6.1). I tabellen redovisas hur porositet
minskar med stigande tryck till 800 kPa. I tab. 6.2 slutligen anges min. och
max. trycktillskotten i profilens olika lager och den porositet som uppkom-
mer i profilens olika lager vid dessa trycktillskottsgränser. I fig. 6.4b ä-
r den på detta sätt beräknade porositeten inlagd för jämförelse med uppmätt
porositet efter packning in situ. Man finner en tämligen god överensstämmel-
se, med hänsyn till de förenklade antaganden som gjorts vid beräkning av
trycktillskott och packningsbenägenhet. I det senare fallet antas att defor-
mation i ett markelement in situ överensstämmer med den som sker i den ut-
skurna provproppen i kompressometern. Blackwell och Soane (1981) finner vid
sin granskning av situationen under en hjullast att denna enkla markmekanis
modell är tillämplig på grund av att skärspänningarna är obetydliga, dvs. a

normalspänningarna är bestämmande för deformationen. Den i detta exempel skissade beräkningsmodellen erbjuder således en möjlighet att förutsäga packningen i en mark vid olika belastningsintensiteter om packningsbägenheten är känd.

Tabell 6.1. Samband mellan porositet och trycktillskott för olika lager i profilen Sätuna.

Relationship between porosity and imposed stress in separate layers of the profile Sätuna.

Lager	Porositet i % för tryck i kPa					
Layer	Porosity in % for stresses in kPa					
cm	0	50	100	200	400	800
0-10	43,3	42,5	41,3	39,7	37,5	34,9
10-20	44,9	44,0	42,7	41,0	38,3	35,2
20-30	42,3	41,3	40,2	38,5	36,6	33,6
30-40	46,8	45,6	43,8	41,5	39,1	35,3
40-50	51,2	50,0	48,0	45,3	42,2	39,2
50-60	52,7	51,3	49,4	47,1	44,1	41,4
60-70	52,0	50,8	49,0	46,7	43,7	40,6
70-80	50,3	49,1	47,5	45,3	42,2	39,0
80-90	47,5	46,7	45,4	44,0	42,1	39,9
90-100	46,3	45,7	45,0	44,1	42,9	41,5

Tabell 6.2. Resultande porvolym i Sätunaprofilen efter trycktillskott orsakad av ytlast med 400 kPa yttryck.

Resulting porosity in the profile Sätuna at stresses imposed by 400 kPa surfacepressure.

Lager	Trycktillskott		Resultande porositet %	
Layer	Stresses		Resulting porosity %	
cm	max kPa	min kPa	%	%
0-10	400	400	37,5	37,5
10-20	360	280	38,8	39,5
20-30	290	220	37,5	38,3
30-40	240	160	41,2	42,4
40-50	200	120	45,3	47,5
50-60	160	80	48,0	50,2
60-70	120	60	48,5	50,4
70-80	90	40	47,8	49,3
80-90	70	30	46,2	47,3
90-100	50	20	45,7	46,1

P1 Enköping, Uppsala län. Denna undersökning över effekten av extremt tung körning har tidigare utförligt redovisats i Eriksson (1975/76), men refereras här för att fullständiga bilden av packning vid olika lastintensiteter. Den utfördes på två jordartsmässigt helt lika lerprofiler på ett militärt övningsfält. Den ena profilen har varit utsatt för tung körning under 30 år, varav 15 år med 50 tons stridsvagnar. Den andra profilen har legat skyddad och i gräsvall under samma tid. Tidigare har det undersökta fältet varit åkermark. De trycktillskott som förekommit i marken har varit dels av statisk dels av dynamisk karaktär. De trycktillskott som maximalt förekommit i profilen under stillastående last anges i fig. 6.5. Jämförelsen av opackad och packad profil till 1 m djup omfattade struktur, maskhålsfrekvens, makroaggregering, vattengenomsläpplighet, total porvolym, porer större än 0,03 mm samt krympning. En klar differens i samtliga undersökta egenskaper kunde konstateras. Det tydligaste sambandet mellan trycktillskott och fysikalisk förändring erhöles i totala porvolymen och i det grova porsystemet > 0,03 mm. Påverkan kunde följas till 100 cm djup (fig. 6.6a och b). I de översta 50 cm av profilen kunde man med blotta ögat konstatera denna inverkan vid granskning av makrostruktur och maskhålsfrekvens. I genomsläppligheten, som är en av makroporsystemet starkt beroende egenskap, framkom också en klar differens mellan profilerna i de översta 50 cm, men även de djupare delarna var påverkade. Vid ett senare tillfälle (1980) har också hållfastheten i profilen undersökts med vingborr och penetrometer. Resultaten redovisas i fig. 6.7a och b. Liksom i övriga egenskaper är influensen mycket stark ned till ca 50 cm. I dessa mekaniska undersökningar påvisas det förhållandet att extrema påkänningar från ytlaster successivt kompakterat marken till ett bärande skikt med elastiska egenskaper. När skiktet nått ca 50 cm tjocklek har dock en jämvikt inträtt så att förekommande laster och trycktillskott balanseras upp. Den packningsgrad som erhållits i detta skikt, enligt de i kap. 5 redovisade kompressometermätningarna, tyder att påkänningarna varit 2 till 3 ggr de beräknade trycktillskotten av statisk natur; i lagret 0-30 cm inom intervallet 400-800 kPa och i lagret 30-50 cm inom intervallet 200-400 kPa. Under 50 cm nivån är markens plastiska egenskaper fortfarande bestämmande och trycktillskotten blir starkt dämpade. Den spårbildning som förekommit på fältet har i huvudsak varit begränsad till lagret 0-30 cm.

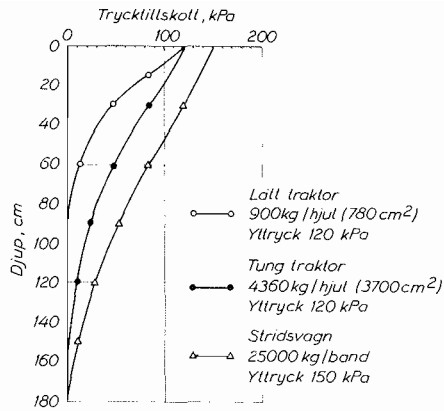


Fig. 6.5. P1. Enköping, Uppsala län. Beräknade trycktillskott i marken under stridsvagn med 50 t totalvikt, bandbredd 61 cm; tung jordbrukstraktor med 4,4 t hjullast, däcksbredd 62 cm; lätt jordbrukstraktor med 0,9 t hjullast, däcksbredd 30 cm (enl. Eriksson 1975/76).

P1. Enköping, Uppsala county. Predicted pressure applied to the soil beneath a military tank of 50 t total weight, track width 61 cm; a heavy agricultural tractor with 4,4 t wheel load, type width 62 cm; and a light agricultural tractor with 0.9 t wheel load, type width 30 cm (acc. to Eriksson 1975/76).

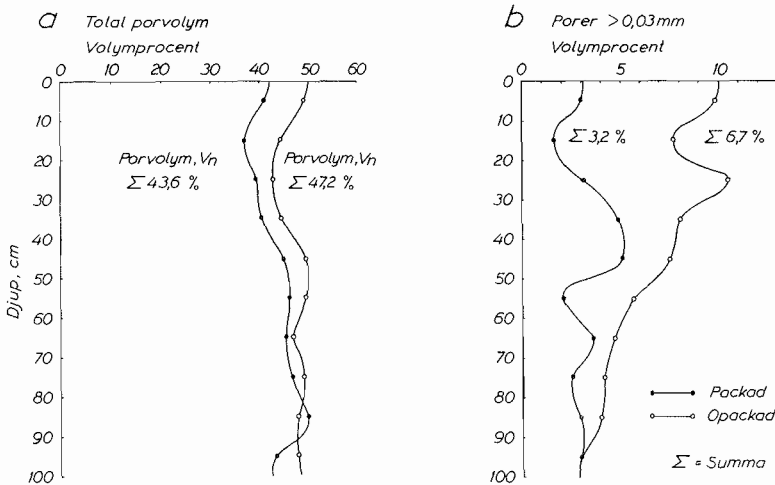


Fig.6.6. P1. Enköping, Uppsala län. a) Jämförelse av totala porvolymen i skyddad gräsbevuxen profil med profil utsatt för tung körning under 30 år varav 15 år stridsvagnar med 50 t totalvikt. b) Jämförelse av mängden porer större än 0,03 mm (dränerbara vid 1,0 m avsugning) i motsvarande profiler.

P1. Enköping, Uppsala county. a) Comparison of the total pore volume in a hidden grass-covered profile with a profile subjected to heavy traffic for 30 years, of which 15 years with 50-tonne military tanks. b) Comparison of the number of pores larger than 0.03 mm (that can be drained at 1.0 m tension) in corresponding profiles.

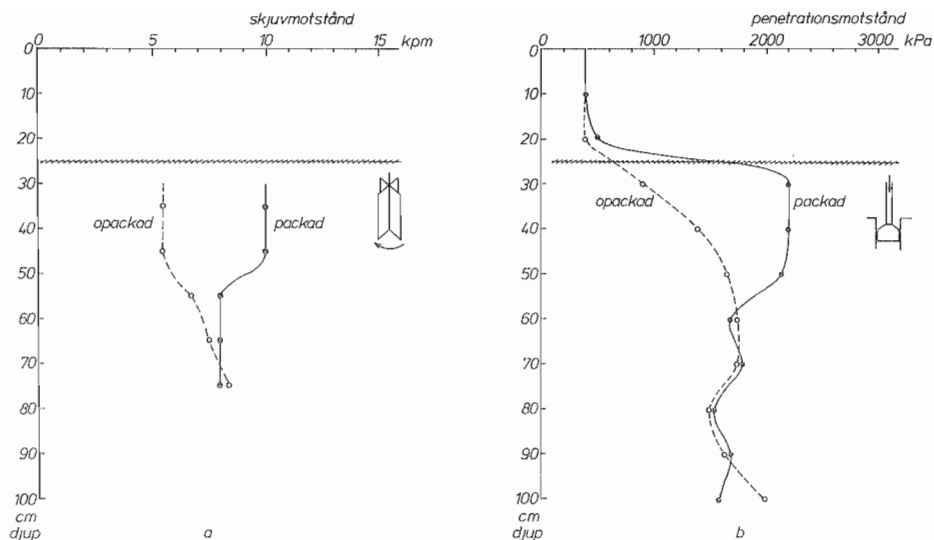


Fig. 6.7a. P1. Enköping, Uppsala län. Skjuvhållfasthet mätt med vingborr i opackad och packad profil. Den undersökta lokalen var vid mättillfället nyplöjd varför inga meningsfulla mätvärden kunde erhållas i matjorden.

P1. Enköping, Uppsala county. Resistance measured with a shear vane in compacted and uncompacted profiles. The profiles investigated had been recently ploughed when measured and thus no meaningful measurements could be obtained in the topsoil.

Fig. 6.7b. P1. Enköping, Uppsala län. Penetrationsmotståndet mätt med penetrometer i opackad och packad profil. Marken var vid mättillfället nyplöjd. Matjordsdelen var därigenom åter uppluckrad och gav låga mätvärden.

P1. Enköping, Uppsala county. Penetration resistance measured by means of a penetrometer in compacted and uncompacted profiles. The soil had been recently ploughed. The topsoil was thus loose and gave low values.

Packning in situ under normala och små ytlaster

Här redovisas markfysikaliska undersökningar i två långliggande fältförsök med jämförelse av vinschat och traktorbrukat led (Olvegård 1969). I försöksplanen ingick jordbearbetning med traktor i enkelmontage, traktor i dubbelmontage och vinschning kombinerad med olika såtider. Försöket Stensfält (mycket styv lera med 70-80 % ler) lades ut 1964 och Skultorp (styv lera med 55-65 % ler) 1967, båda i Skaraborgs län. I försöken har skörden registrerats årligen. Vidare har dragkraftsbehovet vid plöjning mätts samt som komplement också bärigheten mätts med penetrometer. 1973 utfördes provtagning för markfysikalisk analys. Provtagningen begränsades till leden L2 (vinschning, såtid 2) och Te2 (traktor, enkelmontage, såtid 2). Den utfördes med

2,5 cm cylindrar i 4 upprepningar per 5 cm nivå ned till 50 cm djup. På de uttagna proverna bestämdes totala porvolymen och bindningskurvan till 6,0 m dränering. På Skultorp gjordes dessutom luftgenomsläpplighetsmätningar vid olika dräneringar. Under 1973 var Stensfält besädd med höstvetete och Skultorp med ärter. Vid provtagningen den 4-6 juni var beståndet under stark tillväxt.

Resultat

Stensfält. Resultaten av porvolymundersökningen är sammanfattade i fig. 6.8a. Av diagrammet framgår att traktorbrukningen givit en lägre total porvolym i matjorden och att andelen grova porer ($> 5 \mu\text{m}$) i detta led är väsentligt mindre i förhållande till det vinschade försöksledet. I det traktorkörda ledet föreligger ett minimum i dessa volymer i den centrala delen av matjorden, lagret 10-15 cm, och på grund därav en kraftig tillsnörpning av det grova porsystemet med försämrad ledningsförmåga som följd. Vid observationer i fält har man vid riklig nederbörd konstaterat ytvatten i avsevärd frekvens på de traktorbrukade leden medan infiltrationen i de vinschade leden varit godtagbar. Lagringsmagasinet i det grövre porsystemet av matjorden är nära dubbelt så stort i det vinschade ledet, 44 mm, jämfört med 25 mm i det traktorbrukade ledet (fig. 6.8b).

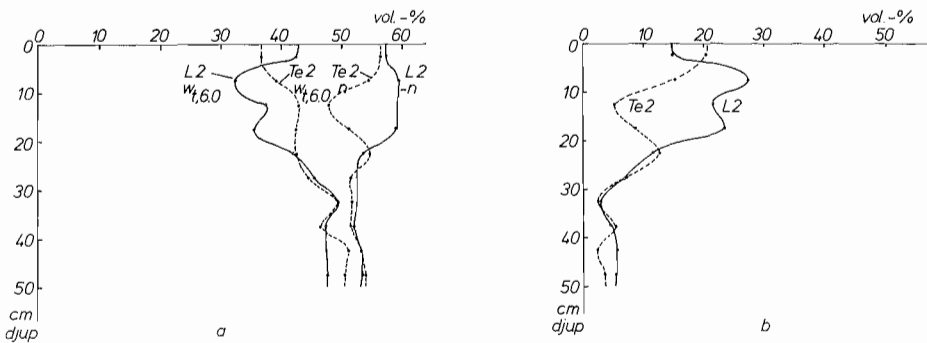


Fig. 6.8. Stensfält, Skaraborgs län. a) Total porvolym och tömd porvolym vid 6 m v p ($> 5 \mu\text{m}$) på försöksled L2 (vinschat led) och försöksled Te2 (traktorbrukat led). b) Det grova porsystemets ($> 5 \mu\text{m}$) omfång och fördelning med djupet under de två brukningssystemen, vinschat och traktorbrukat.

Stensfält, Skaraborgs county. a) Total pore volume and emptied pore volume at 6 m w c in experimental treatments L2 (winched treatment) and Te2 (tractor-tilled treatment). b) Extent and distribution with depth of the macro pore system ($> 5 \mu\text{m}$) under two tillage treatments, winched and tractor-tilled).

Under perioden 1963-73 var skörden i genomsnitt 15 % högre på det vinschade ledet. Dragkraftsbehovet mätt med vingbill till 15 cm djup i matjorden var ca 25 % lägre och bärigheten mätt med penetrometer i centrala delen av matjorden var ca 40 % lägre i det vinschade ledet. Den konstaterade skillnaden i porstorleksfördelning mellan försöksleden medför alltså avsevärd influens på skörd och brukningsegenskaper i dessa jordar. Skördenedsättning en i de traktorbrukade leden kan hänföras dels direkt till sämre såbruk, rotmiljö och genomrotning dels indirekt till en sämre genomsläpplighet, periodvis skadlig vattenmättnad och ytvattenbildning.

Skultorp. Resultaten av porvolymundersökningen är sammanfattad i fig. 6.9a och b. Av diagrammen framgår att traktorbrukningen givit en lägre total porvolym i matjord och plogsula och att andelen grova porer (> 5 µm) också

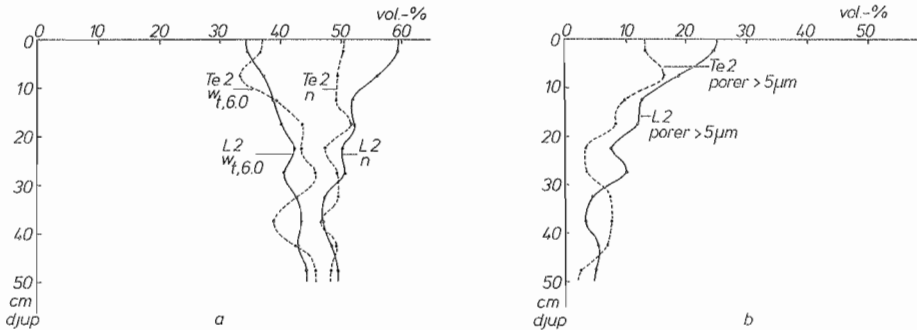


Fig. 6.9. Skultorp, Skaraborgs län. a) Total porvolym och vid 6 m vp tömd porvolym på försöksled L2 (vinschat led) och försöksled Te2 (traktorbrukat led). b) Det grova porsystemets (> 5 µm) omfång och fördelning med djupet under de två brukningssystemen, vinschat och traktorbrukat.

Skultorp, Skaraborgs county. a) Total pore volume and, at 6 m wc emptied pore volume, in experimental treatments L2 (winched) and Te2 (tractor-tilled). b) Extent and distribution with depth of the macro pore system (> 5 µm) under the two tillage systems, winched and tractor-tilled.

Tabell 6.3. Skultorp, luftgenomsläpplighet ml/min. Jfr av L2 = lätt packat, Te2 = tungt packat; harmoniskt medeltal för resp. lager vid olika avsugning.

Skultorp, air permeability, ml/min. Comparison of L2 = lightly compacted, Te2 = heavily compacted; harmonic mean for each layer at different tensions.

Avsugning Tension	Luftgenomsläpplighet cm/min Air permeability cm/min					
	0-50 cm		0-20 cm		20-50 cm	
m vp m wc	L2	Te2	L2	Te2	L2	Te2
0,035	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,05	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,15	3,8	0,0	17	0,0	2,5	0,0
0,30	5,8	0,2	250	0,5	3,5	0,1
0,50	6,2	0,4	317	1,7	3,8	0,3
1,50	7,5	2,8	685	3,2	4,5	2,6
5,00	123,7	25,3	1848	573	76	15

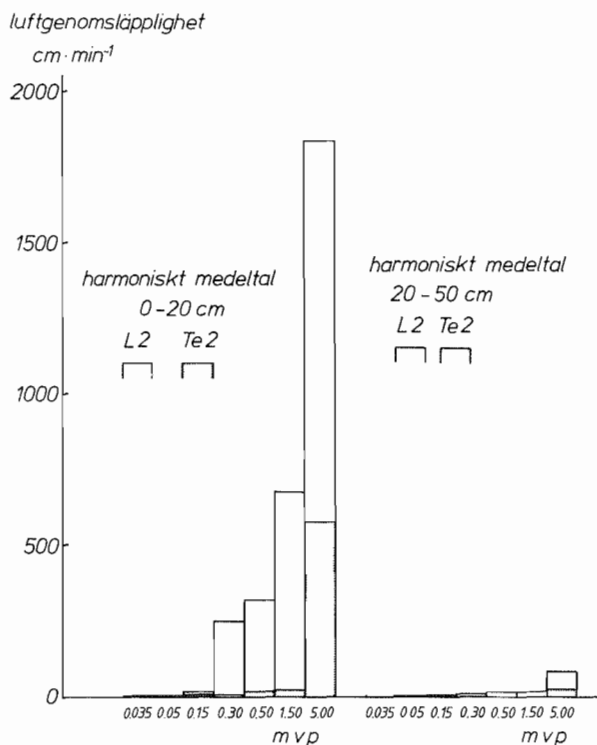


Fig. 6.10. Skultorp, Skaraborgs län. Luftgenomsläppligheten vid olika avsugning på försöksled L2 (vinschat led) och försöksled Te2 (traktorbrukat). Harmoniskt medeltal för lager 0-20 cm och 20-50 cm.

Skultorp, Skaraborgs county. Air permeability at different tensions in experimental treatments L2 (winched) and Te2 (tractor-tilled). Harmonic means for the 0-20 and 20-50 cm layers.

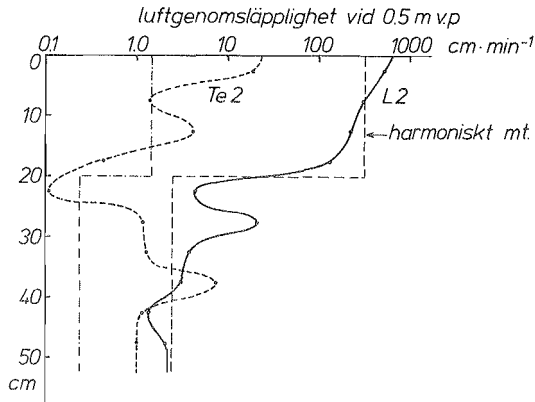


Fig. 6.11. Skultorp, Skaraborgs län. Luftgenomsläppligheten vid 0,5 m vp dränering i profilen till 50 cm djup på försöksled L2 (vinschat led) och försöksled Te2 (traktorbrukat led).

Skultorp, Skaraborgs county. Air permeability at 0.5 m water column drainage in the profile to 50 cm in treatments L2 (winched) and Te2 (tractor-tilled).

Tabell 6.4. Skultorp, luftgenomsläpplighet cm/min vid 0,5 m vp. Jfr av L2 = lätt packat, Te2 = tungt packat; harmoniskt medeltal.

Skultorp, air permeability cm/min at 0.5 m water column. Comparison of L2 = lightly compacted, Te2 = heavily compacted; harmonic mean.

Djup Depth cm	Luftgenomsläppl. cm/min Air permeability, cm/min	
	L2	Te2
	lätt packat lightly compacted	tungt packat heavily compacted
0-5	716	36
5-10	502	1,5
10-15	393	7,5
15-20	150 318	0,7 1,8
20-25	3,9	0,05
25-30	43	1,3
30-35	5,0	1,9
35-40	3,2	16
40-45	1,8	1,7
45-50	4,2 3,8	1,0 0,3

är lägre än i det vinschade försöksledet. Särskilt skall märkas den skillnad mellan de två försöksleden som uppkommit i det grova porsystemet i lagret 20-30 cm (plogsulan). På Skultorpproven genomfördes också en luftgenomsläpplighetsstudie, som visade sig mycket upplysande om hur profilernas funktion påverkades av en ändring i porsystemet. Permeabiliteten mättes i dräneringssteg från 0,035 m vp till 5,00 m vp. I tab. 6.3 är harmoniska medeltalen för profilen och dess lager redovisade. Resultaten är också redovisade i diagramform, fig. 6.10. Det vinschade ledet (L2) med hög andel grova porer ger en betydligt snabbare stegring av luftgenomsläppligheten vid dränering än det traktorbrukade ledet (Te2). För en närmare jämförelse av de två profilerna har genomsläpplighetsvärdena vid 0,5 m dränering valts, tab. 6.4 och fig. 6.11. Skillnaden i genomsläpplighet mellan de två profilerna är redan vid denna dräneringsnivå accentuerad. Observera att en logaritmisk skala använts i diagrammet. Vad innebär då dessa genomsläpplighetstal för markventilationen och en tillfredsställande syrenivå? Här hänvisas till följande avsnitt där ett förslag till klassning av luftgenomsläppligheten angivits (fig. 7.1, 7.2 och 7.3). Enligt denna klassning krävs vid normal syreförbrukning i en mark en luftgenomsläpplighet av 200 cm/min för att en godtagbar syrehalt skall upprätthållas. I de undersökta profilerna har den lätt brukade profilen (L2) redan vid 0,5 m avdränering en god lufthushållning, medan den tungt brukade (Te2) måste dräneras till 5,0 m för att porsystemet skall bli i tillräcklig grad fritt från vatten och luftledande.

De skilda brukningssätten av Skultorpsjorden under 7 år har således liksom på Stensfält lett till en klar skillnad i markrummets byggnad och funktion dels i matjorden dels i plogsuledelen av alven. Under perioden 1968-73 har skörden varit i genomsnitt 36 % högre på det vinschade ledet dock med stora variationer mellan åren. Dragkraftsbehovet vid höstplöjningen har varit 31 % lägre på det vinschade ledet och penetrationsmotståndet i matjordens centrala delar ca hälften av det traktorbrukade ledet.

7. TRYCKTILLSKOTT - LUFTHUSHÅLLNING

Markluften är källan för det syre som växterna förbrukar vid sin rotandning och för det syre som mikroberna kräver. Den är å andra sidan mottagare av den koldioxid som bildas av växterna vid rotandningen och av mikroberna. Andningens livlighet bestäms av rotmassans och mikrobernas utveckling och livskraft samt av marktemperaturen. Andningen anses under vegetations-tiden totalt förbruka 5-20 liter syre och alstra lika mycket koldioxid per dygn och kvadratmeter markyta. Förrådet av syre i en mark räcker normalt till endast ett par dagars konsumtion av rötter, markfauna och mikrobvärld. Av tidiga grundläggande studier av markluften och dess omsättning kan nämnas Russel och Appleyard (1915) och Romell (1922). Samlade översikter av litteraturen på området samt teoretisk och experimentell analys av gastrans- portfenomenen återfinns hos Penman (1940), Currie (1960), Wesseling (1962), Bakker och Hidding (1970). En teoriöversikt parad med undersökningar av jordluftens volym och omsättningsmöjligheter speciellt i åkermark gjordes av Edling (1973).

Gastransport kan ske dels genom diffusion, dvs. molekylrörelser i en stillastående luftmassa och dels genom masstransport, dvs. strömning av hela luftmassan. För dessa luftrörelser är det grova porsystemet, som kan tömmas på vatten redan vid ringa dränering, av avgörande betydelse. Diffusionen är proportionell mot den sammanlagda luftfyllda porytan. Strömningen är därutöver beroende av viss andel grova porer med litet strömningsmotstånd. Vid låg dräneringsgrad är luftomsättningen helt beroende av de grova porerna, eftersom de små porerna då är stängda av vatten. Diffusionsströmmen av t.ex. syre i en mark brukar anges med relativa diffusionen, R_D , som är förhållandet mellan diffusionskoefficienten, D , i markrummet och diffusionskoefficienten, D_0 , för syre i fritt luftrum.

Romell (1922) konstaterade att utjämnigen av syre- och koldioxiddifferenser i marken i huvudsak sker genom den nämnda diffusionsprocessen och att mass- transporterernas bidrag till luftväxlingen i bevuxen mark endast uppgår till någon eller några procent av det totala utbytet. Senare undersökningar såsom Kimball och Lemon (1971, 1972), Edling (1973) anför skäl för att strömning i vissa fall kan ha en väsentlig betydelse för markluftens omsättning. Edling (1973) anger också med ledning av bl.a. Wesseling (1962) en beräkningsmodell och utför beräkningar över syregradienten i mark för vissa typprofiler. Dessa visar att på åkermark kan strukturen i matjorden ge förutsättningar för luftflöden som är viktiga för totala ventilationen av markrummet. Med beräk-

ningsmodeller, som den nämnda, kan också den lägsta diffusionskoefficient som är nödvändig för att upprätthålla en godtagbar syresituation i marken skattas. Edling har antagit en syrehalt av 10 % på 1 m djup som acceptabel, dvs. en halvering i förhållande till halten i atmosfärsluft. Vid normal markaktivitet erhålles därvid värden i området $3 \cdot 10^{-3}$ till $5 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ som begränsande diffusionskoefficienter. Bakker et al. (1980) har med ett omfattande experimentellt material från olika jordar belyst sambandet mellan markstruktur och diffusion. De anger samma storleksordning på diffusionskoefficienten som den ovan nämnda för en godtagbar markventilation och rotmiljö. De konstaterar vidare att vid en lägre diffusivitet än ungefär $D = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ föreligger en konstant bristsituation. Den relativa diffusionen, R_D , är 0,001 vid denna nedre gräns för kritiska området.

I beräkningsmodeller för syrehaltens djupfunktion, t.ex. de som angivits av Edling (1973) eller van Wijk (1980), kan samband utformas för en mer generell bedömning av begränsande syresituationer i en mark. Vid beräkning av underlaget till fig. 7.1a och b har en ekv. enl. van Wijk (1980) använts för profiler med 50 cm resp. 100 cm aktivt djup. Diffusionen antages konstant till dessa djup. Syreförbrukningen är däremot konstant endast i ytlagret och därefter linjärt avtagande. I det första exemplet är ytlagret 5 cm och i det andra 20 cm. Det andra fallet motsvarar närmast en åkermark med 20 cm matjord.

Diagrammen, fig. 7.1a och b, som lämpligen kan benämnas syrebalansdiagram, visar hur syrehalten på 50 cm djup avtar med diffusionen för vissa antagna syreförbrukningstal, som normalt kan förekomma i brukad mark under vegetationstiden. Av första exemplet fig. 7.1a framgår att endast en måttlig sänkning i syrehalt uppkommer vid en relativ diffusion av 0,02 även vid den högsta markaktiviteten dvs. en syreförbrukning av $4,0 \cdot 10^{-7} \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$. Vid en halvering av diffusionshastigheten går dock syrehalten vid nämnda syreförbrukning mot kritisk syrehalt (< 10 %) och vid ytterligare halvering mot noll. Vid låg syreförbrukning - 1,0 till $2,0 \cdot 10^{-7} \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$ - bibehålles en hög syrehalt även vid dessa låga diffusionsvärden. Om 10 % syre antages som minimum för god rotfunktion i den betraktade profilen är således diffusionskoefficienter mindre än $2,0 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ begränsande vid hög syreförbrukning och $4,0 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ vid låg syreförbrukning.

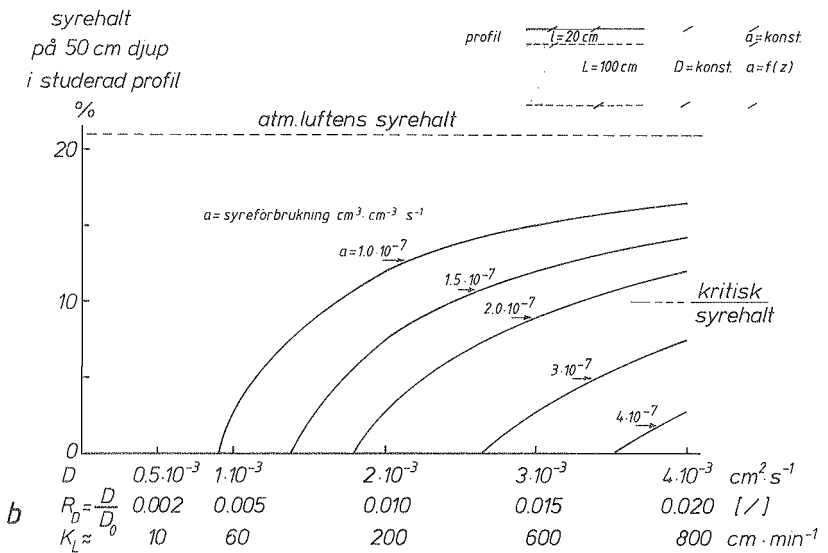
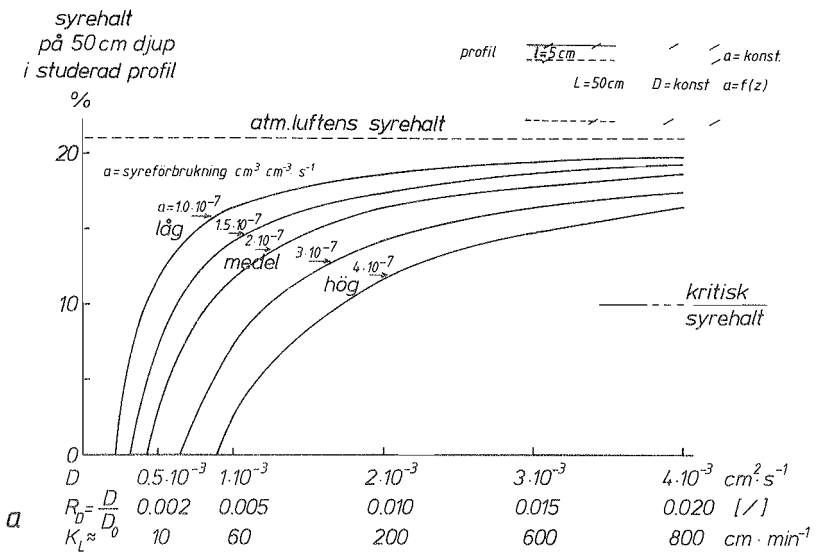


Fig. 7.1. Jordluftens syrehalt som funktion av syrets förbrukning i marken och dess förnyelse genom diffusion. a) Beräkningen avser en profil där syre diffusionen antages vara konstant, medan syreförbrukningen i alven avtar till 0 vid 50 cm djup. b) En profil där syrediffusionen antages vara konstant, medan syreförbrukningen i alven avtar till 0 vid 100 cm djup. Beräkningen avser närmast en åkerjord med 20 cm matjord.

O_2 content of soil air as a function of O_2 consumption in the soil and its renewal by diffusion. a) The calculation assumes a profile where the O_2 diffusion is constant whereas the O_2 consumption in the subsoil decreases to 0 at a depth of 50 cm. b) A profile where the O_2 diffusion is constant whereas the O_2 consumption in the subsoil decreases to 0 at a depth of 100 cm. This case foremost concerns an arable soil with 20 cm topsoil.

I det andra exemplet fig. 7.1b går syrehalten på 50 cm djup enl. samma beräkningsmodell under 10 % redan vid relativa diffusionen 0,02 om syreförbrukningen i profilen är över $3,0 \cdot 10^{-7} \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$. Vid relativa diffusionen 0,01 uppkommer kritisk syrehalt också vid låg syreförbrukning, $1,0 \cdot 10^{-7} \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$.

Samband mellan diffusion och luftgenomsläpplighet

Diffusion och masstransport har fysikaliskt delvis samma krav på markrummets utformning och tillstånd, varför bestämda relationer bör finnas mellan de båda gastransportsfenomenen. Edling (1973) angav teoretiska samband för enkla modellsystem. Han påvisade även experimentellt sambandet på väldefinierade material, såsom torra Atterbergsfraktioner. Förekomsten av ett sådant samband innebär att enkelt och billigt utförda luftgenomsläpplighetsmätningar bör kunna användas för bedömning av markens ventilation och risken för skadliga syresituationer. Grable (1971) och Bakker et al. (1980) påpekar också denna möjlighet. För åkerjord i naturlig lagring föreligger hittills endast få undersökningar som ger underlag för korrelationsberäkningar. Edling (1974) redovisar dock ett experimentellt material för 3 jordtyper. På detta material har i detta sammanhang sambandet mellan relativ diffusion och luftgenomsläpplighet granskats. Av de tre jordarna är två lerjordar med aggregatstruktur, Ultuna och Grävsta, och en mjälajord med enkelkornstruktur, Uddeholm. Undersökningen utfördes på provproppar i naturlig lagring från matjord och övre delen av alven (0-40 cm). Proven dränerades successivt med vattenavförande tryck av 15, 30, 50, 150 och 500 cm vp. I varje steg mättes såväl diffusion som luftgenomsläpplighet. Med avdräneringen steg luftgenomsläppligheten successivt till omkring 1000 cm/min, och relativa diffusionen till 0,02-0,03. Som förut visats har man vid lägre relativ diffusion än 0,02 risk för kritiska syrehalter i en markprofil. Sambandet mellan relativ diffusion, R_D , och luftgenomsläpplighet, K_L , förelåg i totalt 136 värdepar. Av olika prövade samband befanns en potensfunktion $K_L = a(R_D + b)^c$ bäst ansluta till den erhållna punktskaran. Med $a = 4,49 \cdot 10^5$, $b = -0,00054$ och $c = 1,65$ var $r^2 = 0,83$. Luftgenomsläppligheten, K_L , cm/min vid en variation av relativa diffusionen i intervallet $0,002 < R_D < 0,02$ beräknat med det erhållna sambandet redovisas i tab. 7.1. Sambandet har också tecknats i fig. 7.2.

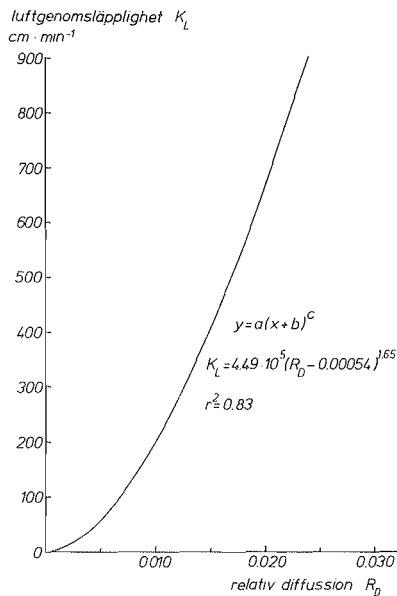


Fig. 7.2. Samband mellan relativ diffusion, R_D , och luftgenomsläpplighet, K_L , cm/min. Materialet omfattar 3 jordar (Ultuna, Grävsta, Uddeholm) och totalt 136 värdepar.

Relationship between relative diffusion, R_D , and air permeability, K_L , cm/min. The material comprises three soils (Ultuna, Grävsta, Uddeholm) and totally 136 pairs of values.

Tabell 7.1. Samband mellan relativ diffusion, R_D , och luftgenomsläpplighet, K_L , cm/min enl. $K_L = 4,49 \cdot 10^5 (R_D - 0,00054)^{1,65}$.

Relationship between relative diffusion, R_D , and air permeability, K_L , cm/min according to $K_L = 4,49 \cdot 10^5 (R_D - 0,00054)^{1,65}$.

R_D	K_L cm/min
0,002	10
0,004	40
0,006	80
0,008	140
0,010	200
0,015	400
0,020	700

För en relativ diffusion av $R_D = 0,02$, som enl. syrebalansdiagrammen ger godtagbar syrehalt i marken även vid hög syreförbrukning krävs en luftgenomsläpplighet av 500-800 cm/min. Relativa diffusionen, $R_D = 0,01$, som blir kritisk vid medelhög syreförbrukning, motsvaras av en luftgenomsläpplighet av omkring 200 cm/min. $R_D = 0,002$, som ger kritisk syrehalt även vid låg syreförbrukning, innebär ett K_L -värde av omkring 10 cm/min. Den gjorda graderingen får med hänsyn till det begränsade underlaget ses som ett preliminärt förslag. Det föreligger ett behov av ytterligare jämförande undersökningar av diffusion och luftgenomsläpplighet i åkerjord enligt den beskrivna metoden. Den preliminära graderingen av luftgenomsläppligheten har använts vid uttolkningen av följande egna undersökningar av packningens inverkan på markventilationen.

Egna undersökningar över packningens inverkan på markventilationen

Luftgenomsläpplighetsmätningar utfördes på prover förda till olika packningsgrad i kompressometer. Undersökningen gjordes på de två jordtyperna Ultuna och Säby, styv lera resp. lättlera. För närmare beskrivning av jordarna se sid. 48 och 45. Provvproppar med höjd 25 mm och diameter 72 mm uttogs i matjord, plogsula och alv. Propparna utsattes efter dränering till 6,0 m vp för trycktillskott av 50, 100, 200, 400 och 800 kPa. Luftgenomsläppligheten bestämdes före och efter packning enl. rutinmetod vid Avd. för hydroteknik (fig. 7.3). Metoden finns närmare beskriven av Andersson (1969). Förundersökningar visade att en god upplösning i luftgenomsläpplighet erhöles vid en dränering till de övre gränsen i intervallet 1,0-6,0 m vp. Även vid de högre packningsgraderna var därvid en del porer frilagda från vatten och tillät en viss luftgenomgång.

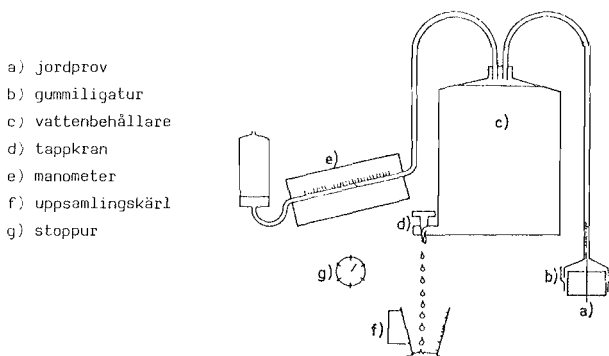


Fig. 7.3. Apparatur för luftgenomsläpplighetsmätning (enl. Andersson 1969). Apparatus for measuring air permeability (acc. to Andersson 1969).

Ultuna. Provpplatsen låg i gräsvall och hade av den anledningen en relativt homogen struktur i matjorden. I såväl matjord som plogsula och alv erhöills proppar med god enhetlighet. I varje lager togs 12 proppar. Vid dräneringsgrad 6,0 m mättes luftgenomsläppligheten före och efter tryckning i trycksteg till 800 kPa. Resultaten redovisas i tab. 7.2. Genomsläppligheten före

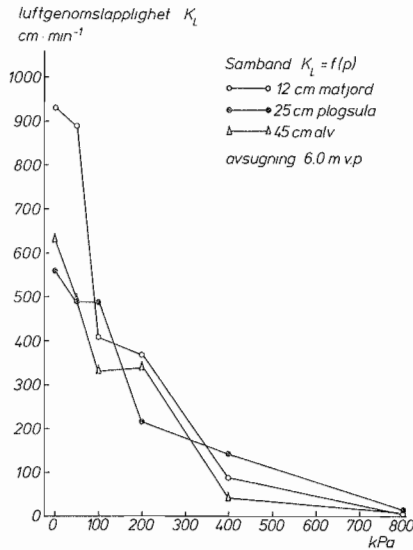


Fig. 7.4. Ultuna, Uppsala län. Samband mellan luftgenomsläpplighet (K_L) cm/min och pålagt tryck för prover från matjord, plogsula och alv. Avsugning 6,0 m vp.

Ultuna, Uppsala county. Relationship between air permeability (K_L) cm/min and pressure applied as regards samples of topsoil, plough pan and subsoil. Tension 6.0 m water column.

Tabell 7.2. Ultuna. Luftgenomsläpplighet, cm/min, vid 6,0 m vp avsugning i matjord (12 cm), plogsula (25 cm) och alv (45 cm), tryck 0-800 kPa.

Ultuna. Air permeability, cm/min, at 6 m wc tension in topsoil (12 cm), plough pan (25 cm) and subsoil (45 cm), pressure 0-800 kPa.

Tryck Pressure	Luftgenomsläpplighet cm/min Air permeability cm/min		
kPa	matjord topsoil	plogsula plough pan	alv subsoil
0	929	565	630
50	891	486	491
100	408	486	328
200	372	220	340
400	84	147	44
800	1	11	6

packning (0-ledet) utgör medeltalet av samtliga 12 proppar, övriga led omfattar 2 upprepningar. För varje trycksteg beräknades ur primärvärdena den relativa minskningen i luftgenomsläpplighet. På 0-ledets ganska säkra medeltal beräknades sedan med hjälp av dessa relativtal de övriga ledens genomsläpplighet. Som framgår av tabellen och fig. 7.4 erhöles en kontinuerlig nedgång. Nedgången i luftgenomsläpplighet är kongruent med den förändring i porstorleksfördelning som konstaterats ske vid packning. Se föregående avsnitt. Enligt den inledningsvis gjorda analysen av sambandet diffusion-luftgenomsläpplighet kan en försämrad markventilation och rotmiljö förväntas vid permeabiliteter under 200 cm/min. Den ursprungliga opackade marken har höga värden, särskilt matjorden, till följd av en del grövre strukturdrag. Skillnaderna utjämnas med ökade trycktillskott och packningsgrad. Vid tryck över 200 kPa går genomsläppligheten ned i den kritiska nivån. Den företer vid 800 kPa mycket låga värden.

Säby. Provplatsen låg i vall, varför strukturen var relativt enhetlig. Provtagningen skedde i representativa skikt av matjord, plogsula och alv med 12 proppar i varje lager. Luftgenomgången bestämdes i likhet med Ultunaprofilen vid 6,0 m vp avsugning. Resultaten redovisas i tabell 7.3 och fig. 7.5. På grund av skillnader i jordart företer luftgenomsläppligheten i Säbyprofilen en från Ultunaprofilen något skild bild. Genomsläppligheten hos plogsula och alv med orörd naturlig lagring är redan i opackat tillstånd låg, i plogsulan inom det kritiska området. Matjorden har genom brukning initialt en hög genomsläpplighet som emellertid redan vid låga trycktillskott starkt försämras. Vid 100 kPa har genomsläppligheten nått den kritiska nivån. Vid högre tryck är genomsläppligheten i de tre lagren likartad. Det är notabelt att också denna jordtyp bibehåller viss genomsläpplighet till 800 kPa.

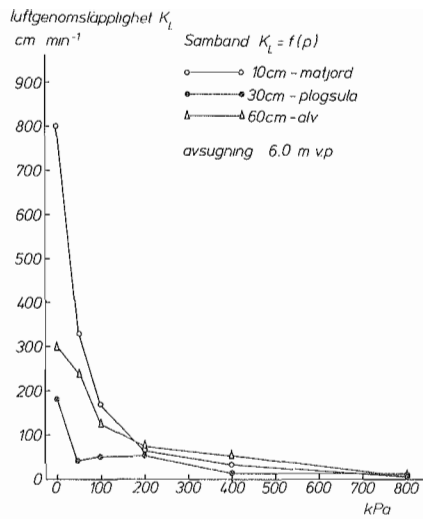


Fig. 7.5. Säby, Uppsala län. Samband mellan luftgenomsläpplighet (K_L) cm/min och pålagt tryck för prover från matjord, plogsula och alv. Avsugning 6,0 m vp.

Säby, Uppsala county. Relationship between air permeability (K_L) cm/min and pressure applied as regards samples of topsoil, plough pan, and subsoil. Tension 6.0 m water column.

Tabell 7.3. Säby, Uppsala län. Luftgenomsläpplighet cm/min vid 6,0 m vp avsugning i matjord (10 cm), plogsula (30 cm), alv (60 cm), tryck 0-800 kPa.

Säby, Uppsala county. Air permeability, cm/min, at 6.0 m wc tension in topsoil (10 cm), plough pan (30 cm) and subsoil (60 cm), pressure 0-800 kPa.

Tryck Pressure	Luftgenomsläpplighet cm/min Air permeability cm/min		
kPa	matjord topsoil	plogsula plough pan	alv subsoil
0	800	191	300
50	335	37	241
100	171	52	129
200	70	58	73
400	35	16	58
800	2	9	5

8. TRYCKTILLSKOTT - PENETRATIONS MOTSTÅND

Enligt skilda undersökningar kan en rotspets utveckla ett tryck av omkring 1000 kPa (Gill och Bolt 1955, Whiteley et al. 1981). Det mekaniska motstånd som en jord erbjuder mot rotspetsen är bl.a. kopplat till jordens textur, struktur, täthet och vattenhalt. De större sprickorna och kanalerna ger helt fri rottillväxt. Allteftersom pordiametern närmar sig rotdiametern kommer porens slingrighet och markskelettets fasthet att inverka på rottillväxten. I ett fullständigt fast skelett stoppas rötterna helt om pordiametern är mindre än rotdiametern. Man har sökt ställa rottillväxten i relation till jordens mekaniska egenskaper såsom t.ex. penetrationsmotstånd. Det motstånd som jorden erbjuder mot en rotspets är dock betydligt lägre än mot en stålspets av samma dimension. Med stålpenetrod har man av den anledningen erhållit gränsvärden för rotgenomtränglig jord varierande mellan 800 och 5000 kPa. Som exempel anges i fig. 8.1 en undersökning av Taylor och Gardner (1963). För den undersökta jordtypen låg kritiska värdet för rotframkomlighet mellan 2000 och 3000 kPa. Whiteley et al. (1981) ger en aktuell översikt av gjorda undersökningar med jämförelser av kvoten mellan penetrationsmotstånd och rotspetsmotstånd. Kvoten varierar mellan 2 och 8. De finner i egna undersökningar med direkt mätning av rotspetskraften värden mellan 3 och 5. Flera förklaringar anges i litteraturen till rotspetsens stora framkomlighet (Barley och Greacen 1967, Greacen et al. 1968, Abdalla et al. 1969, Barley 1970, Eavis 1972, Eriksson et al. 1974, Whiteley et al. 1981). De kan sammanfattas i följande punkter.

- a. Rotspetsen följer i motsats till stålspetsen minsta motståndets väg och utnyttjar små variationer i jordens hållfasthet. Rotspetsen har också en viss rörelseamplitud.
- b. Rotspetsen har en tendens att pressa ihop jorden cylindriskt, dvs. krafterna som utvecklas av spetsen har en relativt stor komponent vinkelrätt mot tillväxtriktningen.
- c. När roten möter motstånd förtjockas den 2 till 3 gånger sin normala tjocklek strax bakom rotmössan. Genom den radiella utvidningen av roten lättas jordmassans motstånd mot själva rotspetsen, så att denna kan tränga vidare. Förloppet är åskådligt i fig. 8.2.
- d. Transporten av vätska till och från rotspetsen kan förändra de mekaniska egenskaperna hos jorden. Rotens vattenförbrukning ger upphov till krympsprickor och även sprickor, som från början varit otillgängliga, öppnas för roten.
- e. Friktionen anses vara liten mot rotspetsen på grund av dels dess förmåga att även vid högt jordmotstånd bibehålla en spetsig form, dels på att den avsöndrar rikligt med slem.

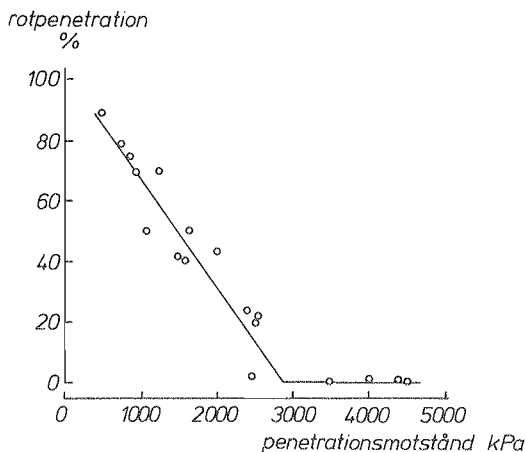


Fig. 8.1. Samband mellan rotpenetration (%) och penetrationsmotstånd i kPa för stålpenetrod. Enl. Taylor och Gardner 1963.

Relationship between root penetration (%) and resistance to penetration in kPa as measured by a steel penetrometer. Acc. to Taylor and Gardner 1963.

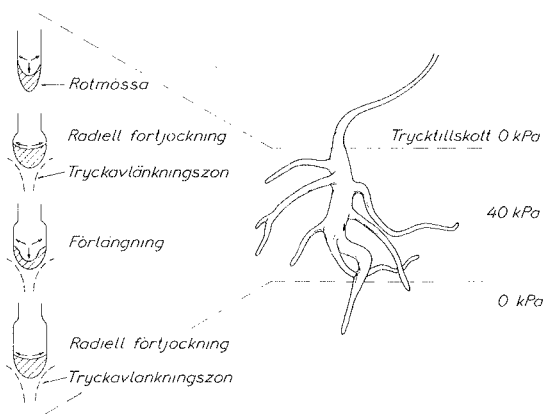


Fig. 8.2. Rotens reaktion vid förhöjt jordmotstånd, dels radiell förtyckning som åstadkommer tryckavläkning framför rotspetsen, dels stark förgrening, varigenom någon gren kan finna en väg med lägre motstånd. Enl. Abdalla et al. 1969.

On meeting resistance in the soil the root reacts both by a radial thickening that leads to a release of pressure in front of the root tip, and also by enhanced branching whereby some roots can find a path with lower resistance. After Abdalla et al. 1969.

Egna undersökningar

Undersökningen har omfattat sambandet mellan trycktillskott och penetrationsmotstånd vid två olika dräneringsgrader i lerjord från Ultuna. Provcylindrar med 2,5 cm höjd togs i matjord, plogsula och alv. Varje försöksled omfattade 4 provproppar. Provpropparna packades i de normerade tryckstegen till 800 kPa vid dels 0,05 m dels 6,0 m avsugning. Därefter utfördes penetrationsmätningar. Därvid användes en nålplatta med 4 nålar, nåldiameter 1,9 mm, 60° nålspetsvinkel och en sammanlagd yta av 11,32 mm². Enl. undersökningen av Whiteley et al. (1981) är penetrationsmotståndet till viss del oberoende av en variation i nålens diameter från 1 mm till 2 mm. Mätningen utfördes i en elektromekanisk skruvpress med skrivare för registrering av kraften. Intryckningen sker i denna press med konstant hastighet. I detta fall valdes hastigheten 2 mm/min. Den registrerade tryckkurvan uppvisar ett relativt konstant förlopp från 5 till 20 mm djup. I den erhållna kurvan avlästes kraften vid 12,5 mm intryckning dvs. mitt i proppen. Den erforderliga kraften per ytenhet av nålarna beräknades. Resultaten redovisas i tabell 8.1 och fig. 8.3 såsom penetrationsmotstånd i kPa.

Tabell 8.1. Samband mellan trycktillskott och penetrationsmotstånd vid avsugning 0,05 m och 6,0 m vp. Matjord, plogsula och alv i lerprofil Ultuna.

Relationship between applied pressure and penetrationresistance at tension 0.05 m and 6.0 m wc. Ultuna: topsoil, plough pan, subsoil.

	Tryck i kPa Pressure in kPa					
	0	50	100	200	400	800
a. 0,05 m tension	Penetrationsmotstånd i kPa Penetrationresistance in kPa					
matjord/topsoil	1025	1696	1879	1961	2889	4885
plogsula/plough pan	795	1493	2023	1890	2765	4090
alv/subsoil	504	751	1237	1767	2014	3507
b. 6,0 m tension						
matjord/topsoil	4329	4417	4726	4991	5256	6007
plogsula/plough pan	2721	3304	3472	3763	4064	5150
alv/subsoil	2102	2138	2677	2968	3145	4576

Som synes av diagrammet fig. 8.3 ökar penetrationsmotståndet i stort linjärt med trycktillskottet på provet. Anmärkningsvärt är också den starka ökningen av penetrationsmotståndet som uppkommit vid dränering till 6,0 m. I det opackade ledet (0-ledet) fyrdubblas motståndet i såväl matjord som plogsula och alv. Motståndet i matjorden ökar t.ex. från ca 1000 till över 4000 kPa vid 6,0 m dränering. Stegningen i penetrationsmotstånd vid ökade trycktillskott är något brantare vid 0,05 m dränering än vid 6,0 m vp. I synnerhet matjorden tycks förändra sina mekaniska egenskaper, så att penetrationsmotståndet ökar starkt. Alven som har den gynnsammaste strukturen, har reagerat med den minsta förändringen både för ökad dräneringsgrad och ökat trycktillskott.

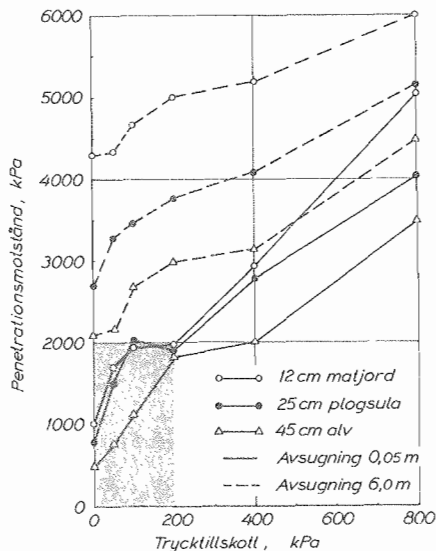


Fig. 8.3. Ultuna, Uppsala län. Samband mellan trycktillskott och penetrationsmotstånd vid avsugning 0,05 m och 6,0 m vp. Matjord, plogsula och alv i lerprofil Ultuna. Inom det skuggade området måttligt rotmotstånd.

Ultuna, Uppsala county. Relationship between pressure applied and penetration resistance at tension of 0.05 m and 6.0 m water column. Topsoil, plough pan and subsoil in the Ultuna clay profile. Moderate root resistance within the shaded area.

De erhållna resultaten visar att penetrationsmotståndet ökar dels genom att markskelettet förstyvas vid dräneringen dels genom att markrummet deformeras av trycktillskotten. I diagrammet fig. 8.3 är området för måttligt rotmotstånd skuggat. Det avgränsas av penetrationsmotståndet 2000 kPa. Detta markmotstånd kan enligt refererade undersökningar ses som ett gränsvärde varöver rotutvecklingen är försvårad. På denna jord överskrides det således genom upptorkning motsvarande 6,0 m vp och/eller trycktillskott över 200 kPa. Beträffande sambandet mellan trycktillskott och rottillväxt hänvisas också till följande avsnitt, där undersökningar redovisas som ger en möjlighet att ytterligare gradera trycktillskottens farlighetsgrad.

9. TRYCKTILLSKOTT - ROTTILLVÄXT

Under brukningen är marken kontinuerligt utsatt för inre och yttre krafter, som tenderar att ändra dess volym. När jorden förtätas avtar porvolymen genom minskning av i huvudsak andelen stora porer såsom visats i tidigare avsnitt. Viktiga funktioner såsom genomsläpplighet för luft och vatten samt framkomlighet för rötter förändras. Markens fysikaliska tillstånd influerar också på mängden vatten och näring som kan tas upp av rotsystemet. Denna verkan kan härröra från ändringar i markens förmåga att lagra och leda vatten och näring eller indirekt från effekter på rottillväxt och rotfunktion, dvs. rötternas förmåga att nå vatten- och näringsmagasinen. Samspelet mellan rottillväxt, mekaniskt motstånd, syretillgång och vattentillgång belyses av diagrammet bild 9.1. Det är utformat enligt data av Eavis (1972) och har tidigare publicerats i Eriksson et al. (1974). Där åskådliggöres resultaten av en undersökning av rottillväxten hos åkerärt i en jord (lerig sand) med olika täthet under stigande dränering. Diagrammet belyser huvudvillkoren för rottillväxt. Med ökad packningsgrad, stigande volymvikt, avtar rottillväxten. Vid en variation av dräneringen finner man ett tämligen brett maximiområde vid 100 cm tension. Vid lägre dräneringsgrad än 100 cm hålls rottillväxten tillbaka genom syrebrist. Även utvecklingen av rothår påverkas i detta intervall (Champion och Barley 1969). Vid hög dräneringsgrad ökar markskelettets fasthet och rottillväxten sänks på grund av mekaniskt motstånd. Vid ytterligare ökad tension blir också vattenbrist orsak till minskad rottillväxt. Mekaniska motståndet blir mer uttalat vid ökad täthet. Undersökningar över rotens reaktion för mekaniskt motstånd har i allmänhet gjorts på omrörda prover som packats eller puddlats till olika täthet (Barley et al. 1965, Bouma 1969). Nedan refererade egna undersökningar är utförda på naturligt lagrade prov vartill också en speciell metodik har utformats.

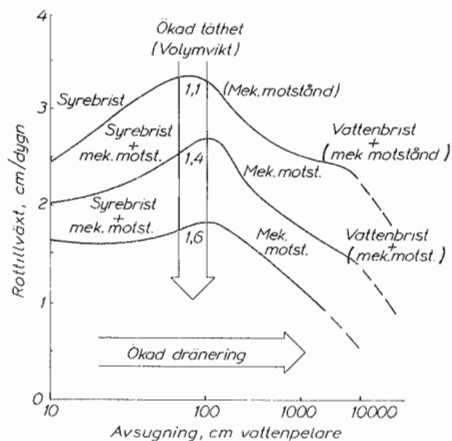


Fig. 9.1. Rottillväxt vid olika packningsgrad under varierande avsugning. Jordart: Lerig sand. Enligt data av Eavis 1972.

Root growth at different degrees of compaction and levels of tension. Soil type: Sandy loam (according to Eavis 1972).

Egna undersökningar

Metodik. Odling av vete skedde på jordproppar med en diameter av 72 mm och en höjd av 25 mm, som packats vid trycktillskott upp till 800 kPa. Dräneringsgraden vid packningen har alternativt varit 0,05 m och 6,0 m. Sju för-grodda vetekärnor bragtes att utveckla sina rötter på propptytan. Odlingen skedde i klimatkammare och under plasthuvar för att minimera direkt avdunstning från propptytan. Plantorna tilläts växa under 11 till 13 dagar och till en höjd av 10-20 cm. De hårt packade leden visade då tecken på vattenbrist. I detta skede bröts försöken och rotutvecklingen studerades. Plantlängd och/eller plantvikt bestämdes. Vattenhalten i jordpropparna bestämdes före och efter tryckning samt efter odling.

Resultat

Ultuna. Det primära syftet var att med metoden visuellt demonstrera rotframkomligheten i jordar med olika packningsgrad. Det visade sig dock möjligt att också kvantitativt belysa vattenavgång vid kompression, vattenupptagning vid tillväxt samt planttillväxt. Resultat från ett sådant odlingsförsök på Ultunajorden med sambandet mellan trycktillskott, rottillväxt, vattenförbrukning och plantlängd redovisas översiktligt i fig. 9.2. Provpropparna är från matjord, plogsula och alv. De har vid 0,05 m vp packats i kompresso-

meter så att utöver opackat led, de fem packningsstegen 50, 100, 200, 400 och 800 kPa erhållits.

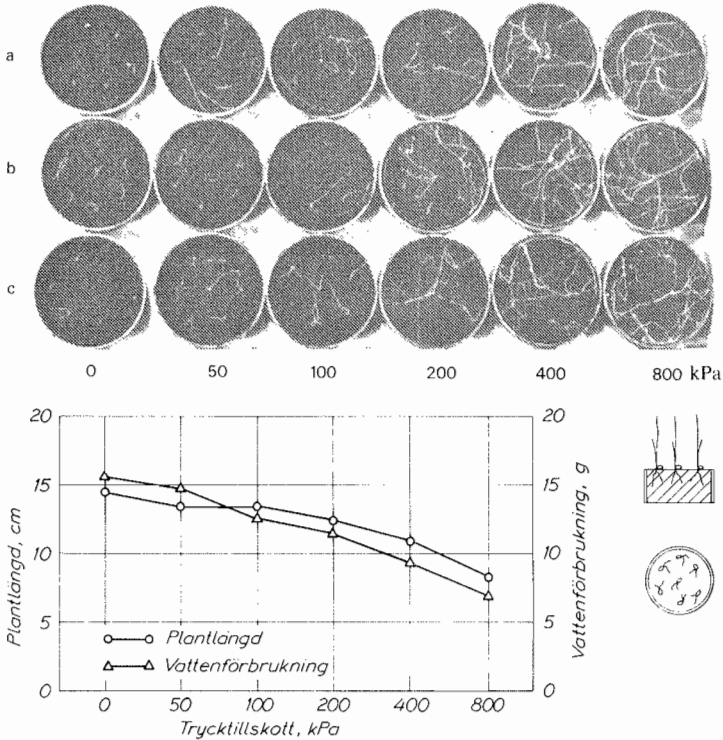


Fig. 9.2. Samband mellan trycktillskott, plantlängd, rotutveckling och vattenförbrukning. Växtslag vårvete. Odling på provproppar enligt metodbilden. Foto av provpropparnas övre yta utvisande stegrad rotmängd på ytan dvs. mindre rotinträngning vid stigande packningsgrad. Ultuna lerjord, a. Matjord, b. plogsula, c. alv.

Relationship between pressure applied, plant length, root development and water consumption. Spring wheat. Cultivation in soil cores as illustrated in the diagram. The photograph of the upper surface of the cores shows increasing numbers of roots on the surface, i.e. less root penetration with increasing degree of compaction. Ultuna clay soil, a. topsoil, b. plough pan, c. subsoil.

Som framgår av rotbilderna har rötterna obehindrat trängt ner genom proppytan i 0-ledet. Vid trycktillskott 50 och 100 kPa var rotgenomgången likaledes god. En del sidorötter hade dock en tendens att gå ut på ytan av proppen. Vid 200 kPa började rotinträngningen bli ytterligare försvårad och rötterna växte på ytan längre sträckor. I synnerhet var det fallet i plogsulan. Vid 400 kPa var rotinträngningen ringa och vid 800 kPa var den helt stoppad och alla rötterna gick på ytan. I 0-ledet och vid de låga trycktillskotten, där rötterna kunde gå in i proppen, var tillväxten av veteplantorna god. Vid 200 kPa började tillväxten minska, och vid 400 och 800 kPa märktes ett ytterligare avtagande. Som synes av kurvan över vattenförbrukning avtog också denna med ökad packningsgrad. Veteplantorna vid 400 och 800 kPa började först lida brist på vatten. Vid begynnande vissning bröts försöket. Såväl rotbilderna som kurvorna över plantlängd och vattenförbrukning tyder på successiv influens på rotmiljön av trycktillskott. Vid 200 kPa har denna influens fått relativt stor negativ verkan. Vid de prövade höga trycktillskotten 400 kPa och 800 kPa utgör det mekaniska motståndet avsevärt hinder för rötterna. Man finner att 200 kPa utgör ett kritiskt gränsvärde. Förutom vete prövades också ärter dvs. en dikotyledonväxt med annorlunda karaktär på rot-system och rötter. Ärternas rötter är grövre än vetets. Den allmänna bilden av rötternas reaktion för packning var dock densamma. Upprepningarna av försöket begränsades därför till vete. I den liknande metodik som angivits av Bouma (1969) användes också vete.

På de två jordtyperna, Ultuna och Säby, genomfördes ett flertal odlingsförsök varunder metoden successivt modifierades med syfte att nå förenkling och en viss standardisering. I det följande redovisas de mätningar av packningsförlopp, vattenavgång och tillväxt som utfördes i samband med odlingsförsöket vid dels 0,05 m och dels 6,0 m avsugning på proppar från dessa jordar.

De allmänna markfysikaliska och markmekaniska egenskaperna av Ultunajorden har redovisats i tidigare avsnitt, sid. 48. Lerhalten ligger i intervallet 40-60 %. Provpropparna från matjorden togs i dess centrala del. Vid provtagningstillfället var matjorden tämligen enhetlig och till synes normalt packad. Plogsulan under matjorden var tydligt utvecklad. Strukturen i alven på provdjupet 40-42,5 cm var mycket godartad. I fig. 9.3 ges en sammanställning av packningsförloppet i de tre lagren för 800 kPa:s tryck vid 0,05 m och 6,0 m vp. Den totala deformationen är i stort lika i de två avsugningsstegen. Den initiala sättningen dvs. den som sker inom 15 s från lastpå-

föringen är däremot avsevärt större vid 6,0 m tension. Alven ger på grund av sin porupbyggnad än större kompression än matjord och plogsula. Plogsulan synes vara minst påverkbar.

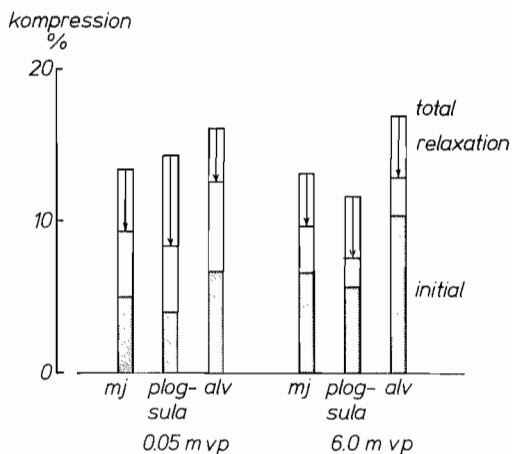


Fig. 9.3. Ultuna. Matjord, plogsula och alv. Packningsförloppet i de tre lagren i tryckintervallet 0-800 kPa. Initial sättning inom 15 s från last-påföring. Relaxation vid 800 kPa.

Ultuna. Topsoil, plough pan and subsoil. Process of compaction in the three layers in the range 0-800 kPa. The initial settling occurred within 15 s of the load being applied. Relaxation at 800 kPa.

En översikt av vattenavgången vid avsugning och kompression samt av plantornas tillväxt ges i fig. 9.4 för matjord, plogsula och alv. Tillväxten av vetet under försöksperioden anges här med plantlängden. Intressanta jämförelser kan göras dels mellan 0,05 m och 6,0 m-leden dels mellan de tre lagren matjord, plogsula och alv. Avgången av vatten vid kompression efter 6,0 m avsugning är som synes av diagrammen mycket ringa. Vid avsugning av denna storleksordning töms den del av porsystemet som deformeras vid tryck intill 800 kPa. Efter 0,05 m avsugning däremot är porsystemet fortfarande fyllt och vattenavgången står i proportion till det pålagda trycket. Detta är tydligast i alven, där det varit möjligt att ta ut provproppar med mycket enhetlig karaktär. I matjorden störs bilden något av variationen mellan proppar. Sambandet mellan kompression, vattenuttag och tillväxt är mycket tydlig i odlingsförsöket med 0,05 m avsugning. Tydligast är sambandet i alvproven men även i momenten matjord och plogsula är tillväxten påverkad av ökad packning. I försöksleden med 6,0 m avsugning ligger tillväxten genomsnittligt något lägre än i försöksleden 0,05 m och dessutom är sambandet med packningsgraden mindre ut-

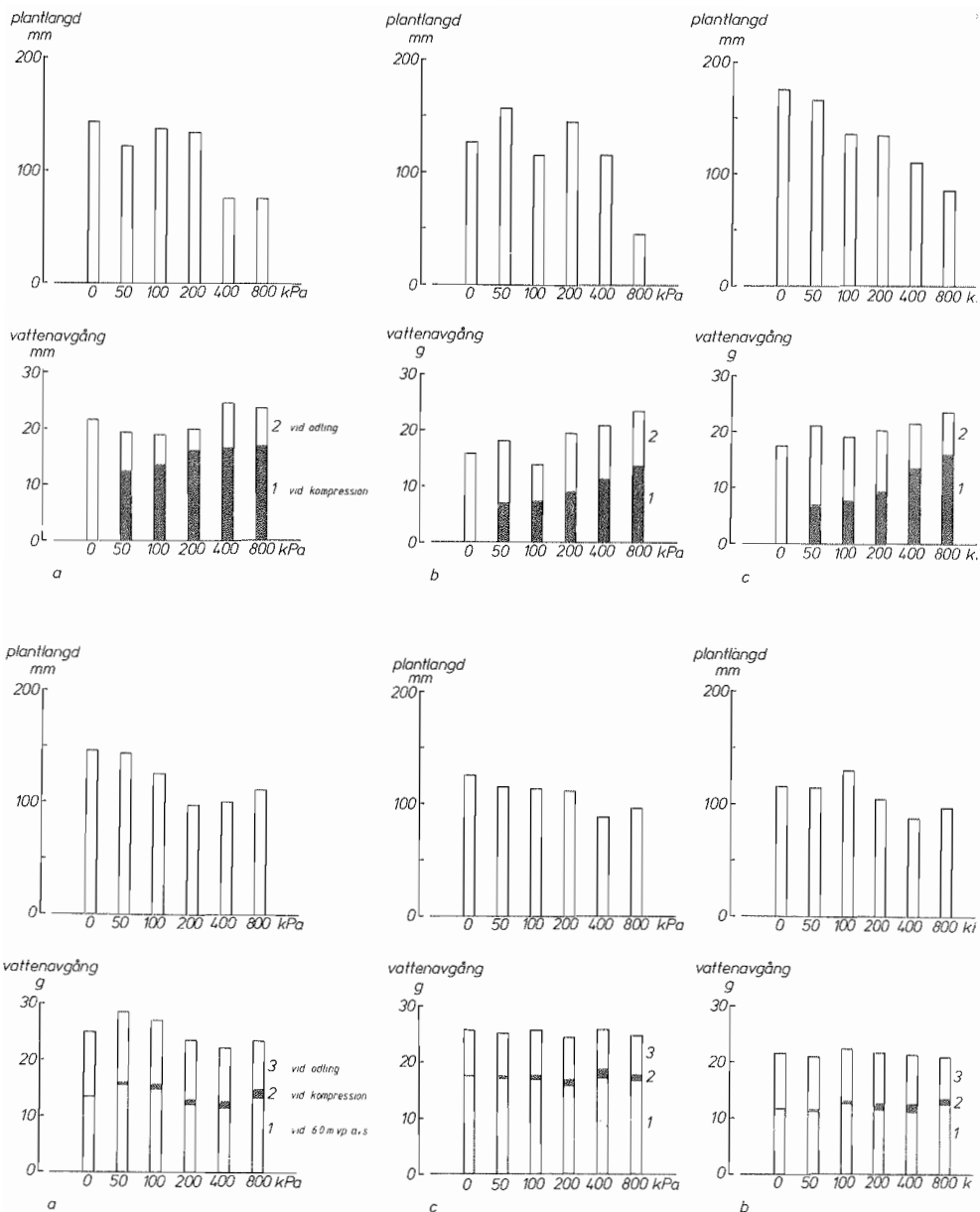


Fig. 9.4. Ultuna. a. Matjord, b. plogsula, c. alv. Odlingsförsök för belysning av inverkan på rotmiljön av packning vid dels 0,05 m avsugning (övre fig.) dels 6,0 m avsugning (undre fig.). Översikt av vattenavgången vid kompression och odling samt av planttillväxt.

Ultuna. a. Topsoil, b. plough pan, c. subsoil. Experiments to illustrate the influence on root environment of compaction at partly 0.05 m tension (upper fig.) partly 6.0 m tension (lower fig.). Water released during compression and cultivation, and plant growth.

talad. Uppenbarligen har det vatten som avgår vid 6,0 m dränering stor betydelse för den initiala rotutvecklingen. Såsom visats i föregående avsnitt hårdnar markskelettet till och ger avsevärt penetrationsmotstånd vid 6,0 m avsugning på denna jordtyp. Tillhårdandet innebär också att det grövre porsystemet vid 6,0 m vp har en något större hållfasthet än vid 0,05 m avsugning och inte deformeras så starkt i de lägre tryckstegen. I de högre tryckstegen, 200 kPa och däröver, är dock deformationen större i det från vatten tömda porsystemet. Tillväxten är också tydligt lägre i dessa led. En kvantitativ bestämning av vattenavgång och tillväxt vid olika packningsgrad ger alltså viktiga upplysningar om den rotmiljö man har i propparna. Det tydligaste sambandet mellan packningsgrad, rotutveckling och tillväxt erhåller man vid låg avsugningsgrad. Är främsta syftet med odlingsförsöket att belysa packningseffekten bör det utföras i intervallet 0,05-1,0 m avsugning. Avsugningar i högre intervall kan som framgår av redovisningen dock ge andra viktiga upplysningar om egenskaper hos markrummet och därmed rotmiljön. Således synes förekomsten av lätt tillgängligt vatten i markrummet ha stor betydelse för groddplantans rötter.

Säby. De allmänna markfysikaliska och markmekaniska egenskaperna på denna provplats redovisas i avsnitt 5 på sid. 45. Lerhalten ligger i intervallet 15-25 %. Den dominerande fraktionen är mo. Jorden är ur markmekanisk synpunkt en mellanjordart och företer friktionskaraktär. Jorden hade vid provtagningen en enhetlig struktur i såväl matjord som plogsula och alv med rimlig variation i porvolym. Plogsulan var utpräglad. Den centrala delen av alven hade låg porvolym men var ändock relativt packningsbenägen.

I fig. 9.5 ges en sammanställning av packningsskeendet i de tre undersökta lagren för 800 kPa tryck. På grund av friktionskaraktären ger 6,0 m avsugning ett fast markskelett och därför en lägre total kompression än 0,05 m avsugning. Däremot är den initiala deformationen större vid 6,0 m avsugning. En översikt av vattenavgången vid avsugning, kompression och odling ges i fig. 9.6 för matjord, plogsula och alv. Tillväxten av vetet under försöksperioden anges här med grönmasselvikten. På grund av kornstorleksfördelningen med hög moandel har Säbyjorden förutom den nämnda friktionskaraktären också kapillära egenskaper. Detta innebär bl.a. att det sker en transport av vatten till rötter som utvecklats på proppytan. Vattenavgången för 6,0 m dränering och för kompression företer samma bild som på Ultuna. Rotutveckling och grönmassetillväxt har liksom på Ultuna klart samband med packningen och tydligast i alvproverna. För Säbyjorden synes förekomsten

av lätt tillgängligt vatten i markrummet ha en större betydelse för den initiala rot- och skottutvecklingen än i Ultunajorden. Vid 6,0 m vp dränering är tillväxten i genomsnitt halverad i förhållande till 0,05 m vp. Även om den enkla försöksmetodiken inte tillåter någon djupare analys av resultaten skall vidare påpekas den tendens till bättre tillväxt vid viss packning, 100-200 kPa, som diagrammen vid 6,0 m dränering visar. Detta kan förklaras av en optimering av den kapillära transporten vid denna tätare lagring.

Den prövade odlingstekniken för att belysa rotmiljön i jord av olika packningsgrad ger i första hand en åskådlig bild av rötternas reaktion. Det är dock möjligt att också få en viss kvantitativ belysning av rotmiljön genom kontroll av vattensituation och mätning av tillväxt. Det är i det avseendet möjligt att ytterligare modifiera metoden för att skärma av felkällor. Den initiala rotutvecklingen och olika växtslags krav på rotmiljö kan på så sätt belysas. Inst, för skogsteknik vid Lantbruksuniversitetet har t.ex. modifierat metoden för studiet av skogsplantors rotutveckling, tillväxt och reaktion för packning (Bredberg och Wästerlund 1983).

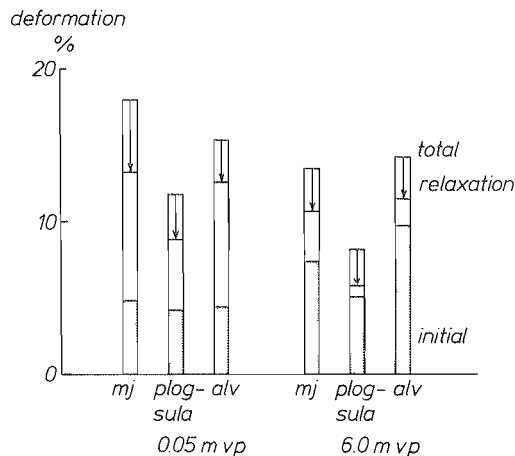


Fig. 9.5. Säby. Matjord, plogsula och alv. Packningsförloppet i de tre lagren i tryckintervallet 0-800 kPa vid avsgugning 0,05 och 6,0 m vp. Initial sättning inom 15 s från lastpåföring. Relaxation vid 800 kPa.

Säby. Topsoil, plough pan and subsoil. Compaction process in the three layers in the pressure range 0-800 kPa at tensions of 0.05 and 6.0 m vp. The initial settling occurred within 15 s of pressure being applied. Relaxation at 800 kPa.

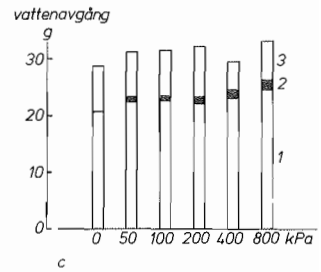
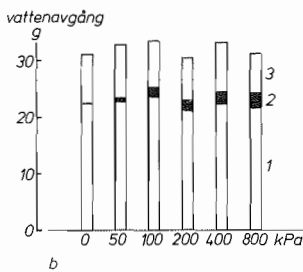
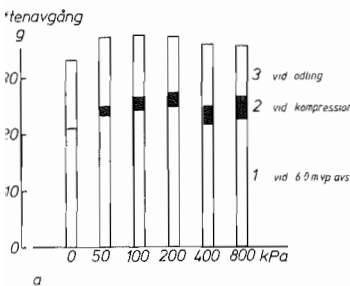
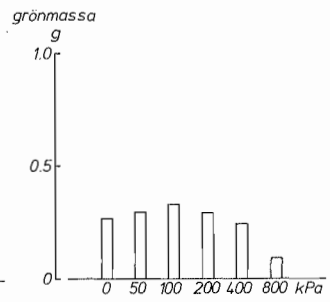
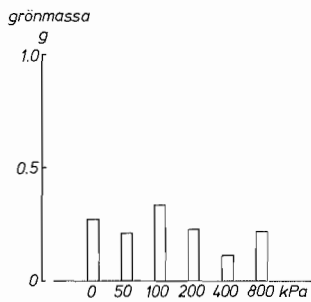
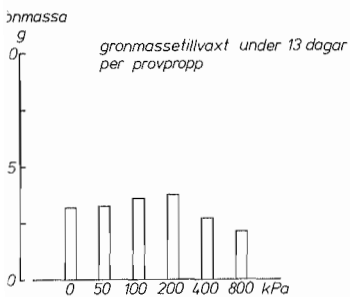
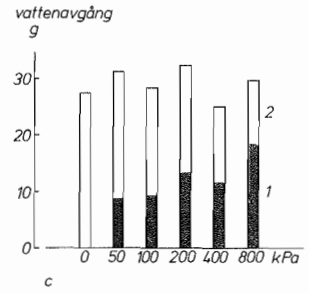
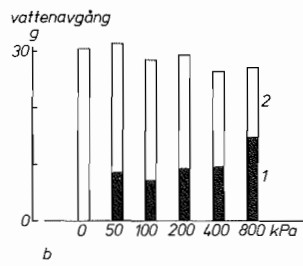
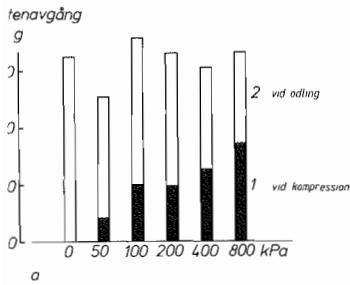
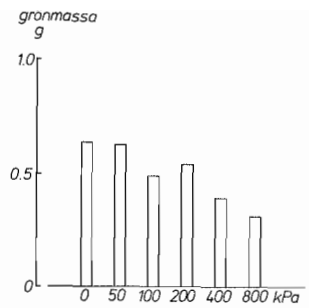
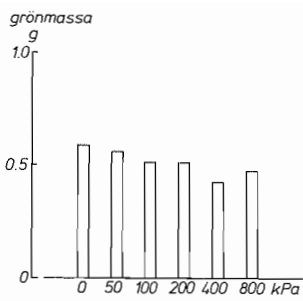
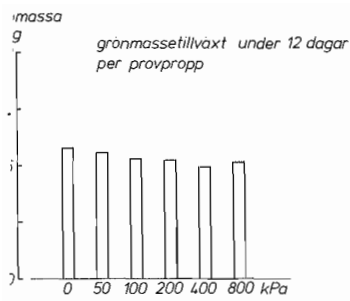


Fig. 9.6. Säby. a. Matjord, b. plogsula, c. alv. Odlingsförsök för belysning av rotmiljöns påverkan av packning vid dels 0,05 m avsugning (övre fig.) dels 6,0 m avsugning (undre fig.). Översikt av vattenavgången vid kompression och odling samt av planttillväxt.

Säby. a. Topsoil, b. plough pan, c. subsoil. Cultivation experiments to illustrate the influence on root environment of compaction at partly 0.05 m tension (upper fig.) partly 6.0 m tension (lower fig.). Water released during compression and cultivation, and plant growth.

10. SAMMANFATTANDE DISKUSSION

I denna undersökning är olika ansatser gjorda att belysa markskelettets hållfasthet och deformation samt de därav föranledda samtida förändringarna i markrummet och därmed i markmiljön. Det grundläggande synsättet har därvid varit att de olika lagren i en profil såväl som profilen i sin helhet intar ett jämviktsläge i fråga om struktur genom de naturliga strukturgenererande processerna och förekommande brukningsinfluenser. Genom extrema brukningsinfluenser kan detta jämviktsläge i markrummet förskjutas med effekter på t.ex. rotmiljön som kan betecknas som skadliga.

I fig. 10.1 är schematiskt tecknat hur jämvikten mellan de strukturbildande och strukturbedbrytande krafterna påverkas av ökade fordonslaster. En allt större del av den för rotutvecklingen mycket viktiga centrala delen av alven utsätts för kritiska påkänningar. I alven erhålles genom trycktillskott från olika slag av laster på markytan eller plogbotten en i huvudsak negativ förändring av porsystemet. Jämviktsläget i matjorden rubbas genom brukningsåtgärder, som kan förändra strukturen i såväl negativ som positiv riktning.

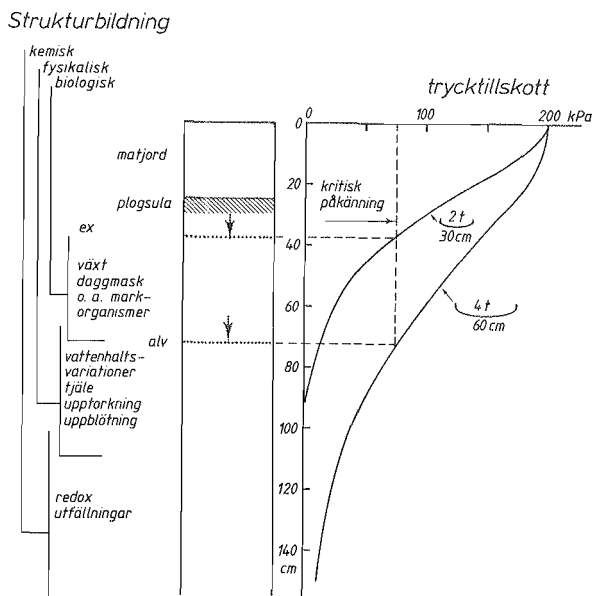


Fig. 10.1. Strukturbildning och brukningsinfluens i åkermark med anvisning om ökningen i djup och intensitet i påkänningarna inom profilen vid övergång från normal till tung körning.

Generation of structure and influence of tillage in arable land illustrating the increase in depth and intensity of the impact in the profile when changing from normal to heavy traffic.

En viktig utgångspunkt för en analys och diskussion av markförändringen är fastställandet av ett "normalt" jämviktsläge hos jorden. En grov anvisning om marktillståndet och ett sådant jämviktsläge lämnar volymvikten eller däremot svarande porositeten och portalet. En sådan prövning på ett begränsat material av finska åkerjordar har gjorts av Heinonen (1960, 1979). Betydelsefulla markegenskaper som gasutbyte, lagring och ledning av vatten samt möjligheter för rotutveckling bestäms emellertid också av porstorleksfördelning och av porsystemets kontinuitet och tortuositet. Vidare är markens motstånd mot deformation vid olika vattenhalt av betydelse för rotpenetrationen. För att bedöma om förändringar i jord till följd av packning är skadliga fordras således att ytterligare strukturkaraktistika utöver volymvikt bestämmas, vidare att markfunktioner av olika slag studeras.

Den utveckling av markfysikalisk metodik som under senare decennier skett gör det numera möjligt att på ett mera allsidigt sätt belysa markrummets egenskaper. För svenska åkerjordar har ett omfattande dataunderlag för karakterisering av strukturen tagits fram i de rutinmässigt drivna markfysikaliska undersökningarna. I här föreliggande undersökning har också markmekanisk metodik utformats för en parallell studie av mekaniska och fysikaliska egenskaper hos våra jordar.

Mekaniska egenskaper hos jordar

När jord belastas sker en viss deformation. De karakteristika som belyser storleken och hastigheten på denna deformation benämnes mekaniska egenskaper. Viktiga sådana egenskaper är packningsbenägenhet och skjuvhållfasthet. Metodik för mätning av jordars hållfasthetsegenskaper har utvecklats i första hand inom geotekniken för att lösa byggnadstekniska problem såsom t.ex. sättnings- och brottriskanalyser. Dessa förutsätter studier i både mikro- och makroskala.

Den typ av deformation som växtens rot eller dess skott ger upphov till, är av delvis annan natur. En experimentell utveckling för belysning av deformationsmekanismen har varit begränsad. Analys av spänning-deformations samband för beräkning av växtrotens markmotstånd erbjuder också en rad mycket svåra moment. Ett allmänt mått på markmotståndet gällande för alla grödor och marktyper är således inte möjligt att fastställa. För bedömning av skadligheten i en förändring av markstrukturen är kännedom om rotsystemets utveckling i markrummet väsentlig. Särskilt skall märkas det förhållandet att rötter och skott huvudsakligen växer i existerande öppna porer och först när de

möter lager som saknar stora porer måste de deformera markskelettet.

Fördjupningen av de vanliga sädesslagens rotsystem är t.ex. 2-3 cm per dygn under det mest intensiva utvecklingskedet, som avslutas med axgång-
en (Wiklert 1961). Rotsystemet når i lerjordar med en välutvecklad makro-
struktur, dvs. sprickor, maskhål och rotkanaler, en slutlig längd av 1
till 2 m. En tillväxthastighet och en utbredning av rotsystemet som de
nämnda är möjlig endast vid helt fri framväxt av rotspetsarna i ett öp-
pet porsystem. Rotfrekvensen angiven som rotlängd per volymenhet jord i
olika horisonter av profilen är därvid belysande (Barley 1970 m.fl.). Så-
som medelvärden för en fullt utvecklad gröda brukar anges 10 cm rötter per
 cm^3 i matjorden, 1 cm/cm^3 på 0,5 m djup och $0,1 \text{ cm/cm}^3$ på 1,0 m djup. En
god rotmiljö i matjord och övre delen av alven framstår således som mycket
betydelsefull. Det är å andra sidan de delar av profilen som i första hand
påverkas av tung körning (Eriksson et al. 1974).

Markprofilen och packningsprocessen

En markprofils tillstånd kan genom intensiv jordbruksdrift förskjutas ur
ett normalt naturligt jämviktsläge. Olika iakttagelser tyder på att ett nyt
jämviktsstadium inträder efter ett antal år av ett visst brukningssystem
(Eriksson et al. 1974). I åkermark särskiljs i packningshänseende matjorden
med ett djup varierande mellan 20-30 cm från underliggande alv. Matjorden
ligger under mycket stark och varierande packnings- och brukningsinfluens.
Dess variation i packningsgrad har som en del av jordbearbetningsproblemati-
ken varit föremål för omfattande studier av bl.a. Håkansson (1966). I alvde-
len av åkermarksprofiler uppkommer en packningsfront till följd av resulter-
ande tryckspänningar från ytan eller från plogbotten.

Packningsprocessen i en mark har belysts av Forsblad (1965) i samband med
omfattande studier av jordkomprimeringen under olika redskap vid avsiktlig
packning. Den deformation som en jord undergår till följd av yttre arbete
kan vara av två slag, elastisk och plastisk. Om deformationen är elastisk,
återbildas kroppens form och motståndet mot formförändringen byggs åter
upp när lasten avlägsnas. En plastisk deformation däremot medför absorption
av energi och bestående formförändring. Jord i luckert strukturtillstånd ha
en låg inre hållfasthet och en låg elasticitet. Packning av jord i sådant
tillstånd innebär därför i princip en plastisk deformation av jorden. Den
upptagning av energi som sker under detta förlopp begränsar räckvidden av
packningskrafterna. Markpartiklarna blir emellertid under packningen omlag-

rade på ett sådant sätt att jorden antar mer och mer elastiska egenskaper. I föreliggande egna undersökningar visar sig detta i en ökad relaxation med stigande pålagd spänning. Beroende på de ovan nämnda förändringarna i markens mekaniska egenskaper tillåts alltså krafterna som verkar på markytan att gå till djup i profilen som är betydligt större än de är i inledningsskedet av packningen. Följaktligen, den zon som består av omlagrade partiklar, dvs. packad jord, blir på detta sätt gradvis utvidgad. Efter viss tid avstannar dock förloppet och jämvikt blir rådande mellan förekommande körmängd och markmotståndet i profilen. Djupverkan i packningen bestäms alltså av i vilken grad markegenskaperna blir elastiska under packningsprocessen. Gränsen mellan packad och opackad jord i markprofiler som påverkats av stora ytlaster är vidare oftast starkt markerad. Så är fallet för den i denna undersökning redovisade försöksplatsen, P1. Enköping (se även Eriksson 1975/76), som varit föremål för extremt tung körning. Olika fysikaliska och markmekaniska undersökningar visar en övergångszon på djupet 50-60 cm mellan starkt packad, elastisk jord och därunder jord som har bibehållit en granulär struktur och plastiska egenskaper. Tidsförloppet i såväl packnings- som regenerationsprocessen blir också enligt detta en viktig bedömningsfaktor av eventuell markförsämring. En förskjutning av strukturen ur jämviktsläget kan i allmänhet endast återställas genom de naturliga strukturupbyggande krafterna. I föreliggande arbete av markpackningens olika aspekter har avsikten varit att ge underlag för sådana översiktliga bedömningar med delstudier av jordarnas packningsbenägenhet, av funktionsförändringar till följd av packning samt av packningsinfluenser i markprofiler till följd av ytlaster.

Tillämpligheten av använd metodik för mätning av markpackningen

I denna undersökning av packningsprocessen har packningsbenägenheten mätts på skiktvis uttagna profilprover med belastning i kompressometer, dvs. en endimensionell hoptryckning. Det är en inom geotekniken känd metodik som på jordbruksjord prövats av bl.a. Söhne (1952-53), van den Berg (1962), Harris (1971), Sommer (1975). Det konstateras i dessa undersökningar att metoden i dess olika modifieringar inte ger en invändningsfri bild av sambandet mellan spänning och deformation i mark. Det komplicerade spänningsfält, som ett jordelement under en hjullast är under inflytande av, förenklas i uniaxiala metoder till att gälla endast den vertikala komponenten. Triaxiala metoder som mera invändningsfritt anger sambandet spänning - deformation, har dock visat sig vara alltför komplicerade och tidsödande för att tillåta mera omfattande studier. Av värde i den valda kompressometermetoden har varit att den kunnat formas i rationella mätrutiner. Därigenom har hög kapacitet och

stort provgenomflöde erhållits. Provintensiteten har kunnat väljas med hänsyn till förekommande variabilitet i torrskorpan av åkermark. En fördel med den enkla uniaxiala kompressometermetoden har vidare varit, att en representativ provuttagning med jorden i naturlig, ostörd lagring kunnat göras. På samma prover kan utföras funktionsstudier t.ex. luftgenomsläpplighet vid olika packningsgrad osv. Av intresse i metodikprovning inom denna undersökning är jämförelsen av statisk och dynamisk, pulserande last. Den visade att den dynamiska, pulserande lasten som mer efterliknar hjullasten är aggressivare på markskelettet. Deformationen under den statiska lasten går dock med tiden mot samma slutvärde. Jämförelsen i detta avseende visar att den enkla uniaxiala kompressometermetodiken med statisk last ger reproducerbara värden på markrummets deformation.

Några sammanfattande synpunkter på resultaten

Resultatredovisningen omfattar dels den inventering av packningsbenägenheter hos ett antal åkerjordar som utförts (kap. 5) dels trycktillskottens inverkan på markfunktionerna (kap. 6 till 9). Redovisningen av packningsbenägenheten har formats för att belysa sambandet mellan befintligt jämviktsläge i markrummet och den erhållna deformationen. För svenska åkerjordar föreligger ett omfattande material från markfysikaliska undersökningar som gör det möjligt att fastställa en för lerklass eller jordart "normal" porstorleksfördelning. Andersson och Wiklert (1972) klassade markfysikaliska data belysande vattenbindande förmågan, primärt efter lerhalt med 5 % klassbredd och sekundärt i jordarter. Samma indelning har följts i denna bearbetning av datamaterialet. Den avser porutrymmet som håller växttillgängligt vatten. Det har delats i fyra porintervall. Intervallgränserna 30, 5, 0,6 och 0,2 μm är lagda så att ur deformationshänseende viktiga porgrupper särredovisas. Indelningen överensstämmer närmast med den av Brewer (1964) föreslagna klassifikationen av markporer. I stället för en ren storleksterminologi (Odén 1957) betonas numera behovet av en terminologi efter funktionen. Greenland (1977) föreslår t.ex. benämningen ledningsporer (transmission pores) i stället för benämningar som grov- och makro-porer. I förekommande indelningar varierar denna gräns från 20 μm (Odén 1957) till 50 μm (Greenland 1977). I denna undersökning har gränsen lagts vid porer > 30 μm som motsvaras av 1 m vp dränering. För porer < 30 μm (eller motsvarande) som håller växttillgängligt vatten föreslår Greenland benämningen lagringsporer (storage pores). Den ytterligare uppdelningen av denna del av markrummet, som gjorts i denna undersökning, ansluter sig också till viktiga funktioner.

Således påverkar förekommande marklaster porssystemet ungefär intill porgränsen 5 μm . Vid gränsen 0,6 μm (50 m vp) upphör även övriga krafters strukturinfluens och porssystemet är i huvudsak beroende av texturen. Ur funktionssynpunkt är också denna gräns betydelsefull. Den avdelar en vattenvolym i markrummet, som är svårtillgänglig för växten men utgör en värdefull reserv vid torka. Enl. vattenhushållningsstudier i bevattningsförsök bör markrummet vara uppfyllt till denna nivå för full tillväxt.

Packningsbenägenheten i relation till porstorleksfördelningen

Som inledningsvis påpekades bör packningsbenägenheten ses mot bakgrunden av porositet och porstorleksfördelning i den undersökta jordtypen. De i packningsundersökningen ingående jordarna har lerhalter från 5 till 85 % och ligger jämnt fördelade på jordartsskalan. De enskilda provplatserna redovisas med fyra diagram som på olika sätt belyser packningsbenägenheten relaterad till markrummet i profilen som helhet och i olika lager. Porositetens (n) avtagande med pålagt tryck (p) anges med exponentialfunktionen $n = a + b^c \cdot p$, där a , b och c är markberoende konstanter. Porositeten, som i utgångsläget är lika med $a + b$, går med ökat tryck asymptotiskt mot den för jorden karakteristiska minimiporositeten a . Värdet på konstanten b är främst beroende av andelen grova porer eller allmänt av porstorleksfördelningen. Konstanten c anger på vilket sätt deformationen genomlöpes. Markskelettets fasthet har samband med det vattenavförande trycket i markrummet. I denna undersökning har dräneringen hållits i intervallet 0,05-6,0 m vp, som också är den vanligaste vattenhaltssituationen vid t.ex. vårbruk. I sammanfattande diagram, fig. 5.25 och 5.26, är profildata över porositetsminskningen vid belastning i intervallet 0-800 kPa ordnade efter lerhalt. I fråga om mekaniska egenskaper kan en gräns läggas vid 25 % lerhalt. Lerpartiklarna dominerar från denna lerhalt i markskelettet. I lerhaltsområdet 25-90 % motsvarar porvolymminskningen vid belastning ungefär den del av markrummet som består av grova porer ($> 5 \mu\text{m}$). Vid lerhalter under 25 % ger sig också friktionen mellan de grövre partiklarna i markskelettet tillkänna, så att de grova porerna i markrummet icke låter sig helt deformeras inom det prövade belastningsområdet.

I en serie diagram, fig. 5.27-5.30, redovisas hur packningen inkräktar på den del av markrummet som håller upptagbart vatten. I friktionsjordar är denna inverkan ringa. I lerjordar deformeras 1/3 till 1/2 av markrummet för upptagbart vatten. Eftersom även absoluta mängden tillgängligt vatten avtar med ökad lerhalt blir den efter packning resterande mängden särskilt låg på styva

lerjordar. Till detta kommer att deformationen träffar den del av porsystemet som är avgörande för dränering, luftning och rotutveckling.

Packning är en komplex händelse i marken med inverkan på förutom de fysikaliska också de kemiska och biologiska egenskaperna. Den influerar på rotmiljön och därmed på olika faser i grödans tillväxt och på slutlig produktion. För förståelse och gradering av "skador" på markstrukturen till följd av tung körning eller körning vid olämpligt marktillstånd fordras parallellt till mekaniska-fysikaliska mätningar också studier av markmiljö och tillväxtbetingelser. Med användning av den metodik som utformats för att inventera åkerjordars mekaniska egenskaper har som en andra del i denna studie olika ansatser gjorts för att mäta och beskriva sambandskedjor såsom trycktillskott - porstorleksfördelning - vatten- och lufthushållning - rotmotstånd och rotutveckling.

I kap. 6 redovisas undersökningar på naturligt lagrad jord över sambandet trycktillskott-porstorleksfördelning. Detaljerade studier av porstorlekssituationen i markprover påvisar att i första hand det grova porsystemet träffas. Packningsprocessen innebär en minskning av makroporernas andel i totala porositeten. Genom nybildning av små porer när stora porer deformeras kan dock vissa porfraktioner öka. Hur långt in i porsystemet som förändringen går kan bland annat av detta skäl inte exakt anges. Gränsen varierar också från jord till jord beroende på den ursprungliga porstorleksfördelningen. I denna undersökning har visats att porer $> 30 \mu\text{m}$ minskar mycket starkt vid packning och att man i porintervallet $5\text{-}30 \mu\text{m}$ har såväl deformations- som omfördelningseffekter. Denna gränsdragning verifieras i andra studier på naturligt lagrade prover, Hartge (1965), Sommer (1975), Walczak (1977). I dessa visas med något olika gränsdragning att det är det grova porsystemet som träffas vid packning. Även i övriga egna undersökningar över effekten av packning in situ under extremt höga ytlaster (Eriksson 1975/76) har erhållits samma bild av packningsprocessen. Jfr här också Håkansson (1979). En ytterligare bekräftelse på att packningen berör det grova porsystemet utgör den egna undersökningen av markrummet under två olika brukningssystem, med och utan traktor. I det senare ledet vinschas redskapen. Efter ca 10 år har ett jämviktsläge utbildats i matjorden som kännetecknas av en större andel grova porer, detta fall $> 5 \mu\text{m}$, på det vinschade ledet. Försöksleden skiljer sig ifråga om dragkraftsbehov, dränerings- och brukningsegenskaper, bärighet samt skörd. Skördeskillnaden kan hänföras dels direkt till bättre rotmiljö och genomrotning i det vinschade ledet dels indirekt till en sämre genomsläpplighet i

det traktorbrukade ledet med periodvis skadlig vattenmättnad och ytvattenbildning. De skilda brukningssätten har således lett till en avsevärd skillnad i funktionen mellan de två profilerna som strukturellt kan härledas till en skillnad i det grova porsystemet.

I avsnitt 6 har också utförts en jämförelse av beräknad och uppmätt packningsgrad för en definierad ytlast. Deformationen på olika djup i profilen till följd av trycktillskott har beräknats med ledning av kompressometerdata över packningbenägenheten. Tämligen god överensstämmelse mellan beräknade och uppmätta porositetsvärden kunde konstateras. På senare tid har liknande beräkningsmodeller föreslagits och prövats av bl.a. Blackwell och Soane (1981) och av Gupta och Larsson (1982).

I avsnitt 7 har olika aspekter på markens lufthushållning tagits upp som underlag för bedömning av packningens inverkan på markventilationen. Syresituationen i en mark är avhängig av dels konsumtionen av syre vid rötternas och markorganismernas andning dels tillförsel av syre. Teoretiska samband för detta har uppställts som ger en möjlighet till beräkning av under vilka förhållanden en begränsande syresituation uppkommer i en mark. I denna undersökning har med denna teori också syrebalansdiagram formats som ger en bild av samspelet mellan de faktorer som bestämmer syreförbrukningen i olika typer av mark. Av de två gastransportheterna, diffusion och konvektion, är diffusionen helt dominerande i markventilationen. Emellertid föreligger ett samband mellan de två formerna, så att luftgenomsläpplighetsmätningar som är enklare att genomföra, kan användas för bedömning av markens ventilation och risken för skadliga syresituationer. Det är emellertid endast ett fåtal undersökningar utförda som belyser detta samband. I föreliggande studie har sambandet mellan diffusion och luftgenomsläpplighet kalkylerats för ett begränsat experimentellt material framtaget av Edling (1973). Med hjälp av syrebalansberäkningar har också en gradering av luftgenomsläppligheten angivits. I egna undersökningar över packningens inverkan på markventilationen, där denna prövats med luftgenomsläpplighetsmätningar, har nämnda gradering använts för att ange för syreförsörjningen kritiska luftgenomsläppligheter. Att märka är att mätningar av såväl diffusion som luftgenomsläpplighet göres med provet i dränerat tillstånd. För en god upplösning i samtliga packningsgrader synes 6,0 m vp vara en lämplig dränering. Enl. analysen av sambandet diffusion-luftgenomsläpplighet kan en försämrad markventilation och rotmiljö förväntas vid permeabiliteter under 200 cm/min. På de undersökta jordarna inträffade detta i trycksteget 200 till 400 kPa.

I avsnitt 8 behandlas sambandet mellan trycktillskott-penetrationsmotstånd. Rotens penetrationsförmåga har av skilda forskare ägnats mycket intresse varvid man också sökt ställa rottillväxten i relation till jordens mekaniska egenskaper mätt med en stålspets av form och storlek som en rotspets. I sådana jämförelser finner man att en stålpenetrod röner 3 till 5 gånger större motstånd än en rotspets och att rottillväxten helt upphör vid 3000-5000 kPa penetrationsmotstånd. Rotspetstrycket kan maximalt uppgå till ca 1000 kPa. I egna undersökningar vid olika dränerings- och packningsgrad visas att penetrationsmotståndet ökar dels genom att markskelettet förstyvas vid dräneringen dels genom att markrummet deformeras av trycktillskotten. I den undersökta lerjorden från Ultuna överskreds ett gränsvärde av 2000 kPa för måttligt rotmotstånd genom upptorkning motsvarande 6,0 m vp och/eller trycktillskott över 200 kPa.

I avsnitt 9 redovisas metodik varmed man i odling får en direkt bild av rotens reaktion för mark som bringats till olika packningsgrad. Förutom en okulär uppfattning om rotframkomligheten erhålles med metoden ett kvantitativt mått på rotutvecklingen genom mätning av vattenuttag och skottillväxt. Odling av vete skedde på jordproppar med en diameter av 72 mm och en höjd av 25 mm, som packats vid trycktillskott i de standardiserade stegen till 800 kPa. Såväl rotbilder som data över plantlängd och vattenförbrukning tyder på successiv influens på rotmiljön av trycktillskott. Vid 200 kPa har denna influens fått relativt stor negativ verkan. Liksom i övriga funktionsstudier framstår 200 kPa som ett kritiskt gränsvärde. Packning och odling har gjorts i två dräneringssituationer, 0,05 m och 6,0 m. Därvid gjordes också den iakttagelsen att rotutveckling och skottillväxt genomgående varit avsevärt sämre vid den högre dräneringen. Detta kan till en del förklaras av att markskelettet hårdnat till, därutöver tycks också det vatten som avgår vid 6,0 m dränering ha stor betydelse för rötternas vattenförsörjning i det initiala skedet.

Sammanfattningsvis kan man konstatera att de rena markmekaniska studierna i denna undersökning kompletteras av de gjorda funktionsstudierna. För att erhålla en totalbild av jordbruksmaskiners och fordons markpåverkan med effekter på grödornas avkastning fordras förutom faktorsanalys av markmiljön också fältförsök för syntes av biologi, teknik och ekonomi (Eriksson et al. 1974). Först därigenom är det möjligt att ange handlingsalternativ för jordbruket som är tekniskt möjliga och ekonomiskt fördelaktiga. En rad åtgärder skall då beaktas och sammanvägas såsom dränering, kalkning, göds-

ling, olika jordbearbetnings- och växtodlingsåtgärder utöver val av mest lämpade maskintyper- och storlekar, hjulutrustningar, maskinkapacitet m.m. Föreliggande studie har i första hand utgjort en del i dessa alternativvärderingar. Kartläggningen av strukturskador och analyser av avvikelser från normalt jämviktsläge i markprofilen ger också anvisningar om angreppssätt för kommande studier av regenereringsprocessen i packningsskadad jord.

SAMMANFATTNING

Jordbrukets rationalisering och mekanisering under de tre senaste decennierna har inneburit att åkerjorden utnyttjas hårdare. Samtidigt har kraven på markens produktionsförmåga och tillgänglighet höjts. Åkermarkens fysikaliska tillstånd påverkas primärt framförallt av grundförbättringsåtgärder såsom huvudavvattning och dränering. Under olika nyttjandeformer och brukningssystem går sedan marken mot ett jämviktsläge i fråga om struktur, där strukturbildande naturliga processer och brukningsinfluenser såsom trycktillskott från traktorer och maskiner är balanserade. De strukturpåverkande krafterna avtar i frekvens och intensitet med djupet i marken. Av intresse är i första hand påverkan till 1 meters djup och i vad mån skadliga förskjutningar i jämviktsläget sker inom denna del av markprofilen. I denna undersökning är olika ansatser gjorda att belysa markskelettets hållfasthet samt deformationer i markrummet och därav föranledda förändringar i markens funktion och i rotmiljön. Arbetet har innefattat - utformning av metodik för mätning av deformationsegenskaperna i matjord och alv av torrskorpan, - en inventering av packningsbenägenheten i ett antal åkerjordsprofiler - en analyserande och generaliserande del av packningens inverkan på markens byggnad och funktion.

Packningsbenägenheten har mätts på skiktvis uttagna profilprover med belastning i kompressometer, dvs. en endimensionell hoptryckning. Särskild vikt har lagts vid att forma den valda metoden i rationella mätrutiner för hög kapacitet. Mätningarna har utförts på cylinderprov med jorden i naturlig, ostörd lagring. På proven har parallellt kunnat utföras också mätningar av fysikaliska egenskaper och funktionsstudier. Mätningar har företagits i det tryckintervall, 0-800 kPa, inom vilket trycktillskott från fordonslasten i huvudsak varierar i en markprofil. I metodikprövningen har också ingått jämförelse av statisk och dynamisk, pulserande last, vilken visade att den enkla uniaxiala kompressometermetodiken med statisk last tillfredsställande belyser markrummets deformation. Ur mätdata beräknas först den relativa kompressionen, som är höjdminskningen i procent av utgångshöjden. Med data över kompakt densitet och skrymdensitet kan

beräkningarna föras vidare till porositet eller portal. I bearbetningen av materialet har i första hand porositeten använts med hänsyn till att den i markstudier i övrigt inom jordbruket är mest frekvent.

Enligt den beskrivna metodiken har deformationsegenskaperna undersökts i 19 markprofiler. De undersökta jordtyperna utgör ett urval ur ett större material om 250 markprofiler för vilka fullständiga markfysikaliska data föreligger. Utförda bearbetningar av detta större material belyser bl.a. det jämlikhetsläge i fråga om porositet och porstorleksfördelning som olika slags åkerjordar befinner sig i. Av särskilt intresse är makroporsystemets andel av totala porsystemet. I lerjordar utgör det en anmärkningsvärt liten andel. De är dock fördelat på sprickor, maskhål och rotkanaler, som ger god kontinuitet i porsystemet av stor betydelse för en rad markfunktioner. Deformationsegenskaperna hos de studerade profilerna redovisas i diagram som dels ger samband mellan pålagt tryck och erhållen porositet för olika lager i profilen och för profilen i sin helhet, dels tidsförloppet i deformationen vid olika dräneringsgrader. Porvolymminskningen för lerorna vid trycktillskott intill 800 kN/m² motsvarar i genomsnitt den del av markrummet som upptas av grova porer. I detta fall den del av porsystemet som dräneras vid 6,0 m vp. I jordar med lerhalter under 25 % inverkar också friktionen mellan markpartiklarna på packningsnägenheten och deformationens storlek är mindre än den volym de grova porererna upptar.

Med användning av den metodik som utformats för att inventera åkerjordars mekaniska egenskaper har som ett andra avsnitt i detta arbete, studier utförts i hur markrummets deformation inverkar på markmiljö och tillväxtbetingelser. I taljerade studier av markrummets förändring under packningsprocessen visar det grova porsystemet träffas. Således påverkas de porer som friläggs vid dränering mycket starkt. Inverkan kan dock spåras också i de delar av porsystemet som friläggs vid dränering intill 6 m vp. Markrummets deformation vid kompressometerpackning har vidare jämförts med den deformation som uppkommer in situ i markprofiler under olika brukningssystem eller under ytlaster av olika intensitet. Fältstudierna bekräftar att packningen berör det grova porsystemet och att skillnader i funktion hos olika försöksled strukturellt kan härledas till de grova porerna i markrummet. Dessa studier visar också att deformation på olika djup i profilen till följd av trycktillskott under definierade ytlaster kan approximativt beräknas med ledning av kompressometerdata över packningsnägenheten.

I ett avsnitt om packningens inverkan på markens lufthushållning belägges ytterligare det grova porsystemets betydelse för en god funktion hos marken. En översikt ges av de mekanismer som bestämmer markventilationen och vidare belyses i syrebalansdiagram under vilka förhållanden en för rotens syreförsörjning kritisk situation uppkommer. De egna undersökningarna visar att luftgenomsläppligheten och därmed syrediffusionen går ned till kritiska värden när påkänningarna i markskelettet nått till nivån 200-400 kPa. I två separata undersökningar belyses slutligen hur packningen påverkar penetrationsmotståndet och rotframkomligheten i markrummet. Detta sker dels med den gängse metodiken att med en stålspets mäta markmotståndet dels med en metodik varmed man i odling direkt visar rotens reaktion för mark som bringats till olika packningsgrad. Undersökningar vid olika dränerings- och packningsgrad visar att penetrationsmotståndet ökar dels genom att markskelettet förstivas vid dränering dels genom att markrummet deformeras och förminskas av trycktillskotten. Liksom i övriga funktionsstudier framstår 200 kPa som ett kritiskt gränsvärde.

I en sammanfattande diskussion framhålls att för bedömning av skadligheten i en förändring av markstrukturen är kännedom om rotspetsens tillväxtmekanism, rotens penetrationsförmåga och rotsystemets utbredning i markrummet väsentlig. Särskilt skall märkas att kulturväxternas rötter, som under kort tid skall formas till ett effektivt rotsystem, kräver ett öppet markrum dvs. i lerjordar ett makroporsystem av sprickor, maskhål och rotkanaler. Vid tung maskindrift får översta metern av markprofilen stora och frekventa trycktillskott som i första hand träffar detta makroporsystem med en sämre rotmiljö som följd.

Föreliggande studie av markrummets deformation och över följdverkningarna på markens funktion utgör ett led i den omfattande forsknings- och försöksverksamhet avseende markpackning som bedrivits i Sverige. Denna verksamhet har givit anvisningar för jordbruket om handlingslinjer som är tekniskt och ekonomiskt möjliga för att undgå fysikalisk markförsämring. Utöver anpassning av maskiner och fordon måste också olika odlingsåtgärder beaktas såsom ex. dränering, kalkning, modifierad jordbearbetning och växtodling.

SUMMARY

In the present investigation studies are made on the deformation of soil by compactive forces, and of the resulting simultaneous changes in pore space and thus in the soil environment. The approach on the subject has been that the different layers in a profile, as well as the profile as a whole, assume equilibrium as regards structure through the natural structure-forming processes and the influence of compactive forces by tillage and traffic. As a result of e.g. extreme traffic forces this equilibrium in the pore space can be altered, with resulting effects on, e.g. root environment, that can be regarded as harmful.

Fig. 10.1 illustrates diagrammatically how the equilibrium between generation of structure and degradation is influenced by heavy traffic. An increasingly proportion of the central part of the subsoil that is of such importance for root development is subjected to critical impacts. In the topsoil the equilibrium in structure can shift due to tillage operations in either negative or positive direction. In the subsoil a largely negative alteration of the pore system is obtained through compaction pressure from different kinds of loads on the soil surface or on the plough bottom.

A starting point for an analysis and discussion of alterations in the soil is the determination of a "normal" equilibrium in the soil. A rough guide to the soil status is obtained by the bulk density or the corresponding porosity or void ratio. An examination of this kind have been done on a few types of Finnish arable soils by Heinonen (1960, 1979). Soil characteristics such as root resistance, gas exchange, storage and permeability of water, etc. are determined, however, also by the pore size distribution and by the continuity and tortuosity of the pore system. In addition, the resistance of the soil to deformation at different water contents is of importance for root penetration. Thus, judgements whether alterations in soil resulting from compaction are damaging will require in addition to the bulk density also determinations of structural characteristics, as well as of soil functions of different kinds.

The development of soil physical methods that has occurred during recent decades now enables a more all-round illustration to be made of pore space characteristics. Comprehensive data material for Swedish arable soils as regards physical properties have been obtained from this routine investigations. In the present investigation soil mechanical methods have also been developed to enable a parallel study of mechanical and physical properties of Swedish soil

Mechanical properties of soils and root development

When a soil is compacted a certain deformation occurs. The characteristics that illustrate the size and rate of this deformation are called mechanical characteristics. Important examples are compaction vulnerability and shear strength. Methods of measuring the strength properties of soils have been developed primarily in geotechnics to solve building problems such as risk analyses of settlements and ruptures. Such analyses require studies on both the micro- and macroscale.

An experimental development to illustrate the deformation mechanism caused by the roots or shoots of a plant has been limited. Analysis of stress and strain relationships when calculating the soil resistance offered to a plant root involves a number of complicated considerations. Therefore it is hard to determine a common measure of root resistance that applies to all soils. Knowledge of the growth mechanism of roots and the development of the root system in the pore space is important for judgements of damage caused by an alteration of the soil structure. It should be noted that roots of arable crops mainly grow along existing open pores and do not need to deform the soil until they reach layers that lack large pores.

The root system of common cereals penetrates vertically 2-3 cm per day during the most intensive developmental stage, which terminates with heading (Wiklert 1961). In clay soils with a well-developed macrostructure, i.e., cracks, worm holes and root channels, the root system reaches a final depth of 1-2 m. However, a growth rate and an extension of the root system to the degree mentioned is only possible when the root tips are able to grow freely in an open pore system. In this connexion, it is interesting to know the root frequency in terms of root length per volumetric unit of soil in different horizons of the profile (Barley 1970, and others). Mean values for a fully-developed crop are usually stated to be 10 cm of roots per cm^3 in the topsoil, 1 cm/cm^3 at a depth of 0.5 m, and 0.1 cm/cm^3 at 1.0 m. A good root environment in the topsoil and the upper part of the subsoil is thus very important. On the other hand, these parts of the profile are those that are primarily influenced by heavy traffic (Eriksson et al. 1974).

The soil profile and the compaction process

The condition of a soil profile can be altered from a normal, natural, state of equilibrium by intensive agricultural operations. Different observations indicate that a new equilibrium occurs after a number of years in a given system

of tillage (Eriksson et al. 1974). In arable land, differentiation is made as regards compaction between the topsoil with a depth varying between 20-30 cm and the deeper subsoil. The topsoil is subjected to heavy and variable compaction and tillage influences. The variation in the degree of compaction in topsoil has been subjected to comprehensive studies by Håkansson (1966), among others. In the subsoil part of arable land profiles a compacted horizon will occur as a result of stresses applied from the surface or from the plough bottom.

How compaction proceeds in a soilmass has been illustrated by Forsblad (1965) in connexion with comprehensive studies of soil compression under different implements when compaction was applied purposely. The deformation subjected to a soil following a surface operation may be of two kinds, elastic or plastic. If the deformation is elastic the shape of the deformed soilbody will be recovered and the resistance to changes in shape will again be created when the load is removed. A plastic deformation, on the other hand, leads to a lasting alteration in form with absorption of energy. Soil in a porous structural state has a low internal strength and low elasticity. Compaction of soil of this kind thus in principle implies a plastic deformation. The uptake of energy that occurs during this process limits the extent of the compaction forces. However, the soil particles during compaction will be rearranged in such a way that the soil will receive increasingly elastic properties. Investigations carried out by the author illustrate in this respect an increased relaxation with increasing stress applied. Depending on the above-mentioned changes in the mechanical properties of the soil, forces at work on the soil surface are allowed to penetrate to depths in the profile that are considerably larger than those occurring in the initial phase of the compaction. Consequently, the zone consisting of rearranged particles, i.e., compacted soil, will in this way be gradually extended. However, the process ceases after a certain time and equilibrium is achieved between the amount of traffic and the soil resistance in the profile. The depth of the compaction is thus determined by the degree to which the soil properties become elastic during the compaction process. This leads to the formation of a clear boundary between compacted and uncompacted soil in profiles that are influenced by large surface loads. This is also observed in the field e.g. at the site discussed in the present report, the military training area at Enköping (see also Eriksson 1975/76), which has been subjected to very heavy traffic. Different physical and soil mechanical investigations demonstrate in this case a transition zone at a depth of 50-60 cm between severely compacted, elastic soil and so at deeper levels which has retained a granular structure and plastic proper-

ties. The time process in both compaction and regeneration processes will, thus, be an important factor to consider for possible soil deterioration. A shift of the structure away from equilibrium can generally only be restored by means of the natural forces of structure creation. The present study of the different aspects of soil compaction has intended to provide a basis for such general judgements by means of studies of the compaction vulnerability of soils, of function alterations following compaction, as well as the influence of compaction in soil profiles as a result of surface loading.

Applicability of the method used for measuring soil compaction

In the present investigation of the compaction process the compaction vulnerability has been measured in soil cores removed from the profile by means of loads applied in a compressometer, i.e., a one-dimensional compaction. This is a method used in geotechnics and which has also been applied on agricultural soils by, among others, Söhne (1952-53), van den Berg (1962), Harris (1971) and Sommer (1975). In their investigations it was emphasized that the uni-axial method in its different modifications did not give a fully satisfactory picture of the relationship between stress and deformation in situ. The tri-axial methods, which give a better relationship between stress and deformation, are however, far too complicated and laborious to permit more comprehensive studies. An advantage of the compressometer method chosen was that it could be designed along rational measurement routines. In this way a high capacity could be achieved with a large number of samples tested. The sampling intensity could be chosen with regard to the actual variability in the dry crust of arable land. Another advantage of this simple uni-axial compressometer method was that a representative sampling of soil in natural undisturbed layers could be accomplished. This permitted the same samples to be used for function studies of, for example, air permeability at different degrees of compaction. In the method testing a static load has been compared with a dynamic, pulsating load. It was found that the dynamic, pulsating load which corresponds more to the wheel load, is more aggressive on the soil. However, the deformation under a static load goes towards the same final value with time. In this respect the comparison demonstrates that the simple uni-axial compressometer method with a static load provides reproduceable values of the deformation of pore space.

A brief summary of results

The results comprise both the inventory of the compaction vulnerability of a number of arable soils as well as the influence of the stress applied on soil functions. As regards compaction vulnerability, the results have been compiled so as to illustrate the relationship between an existing equilibrium in the pore space and the deformation obtained. Comprehensive material is available for Swedish arable soils from soil physical investigations which make it possible to determine a "normal" pore size distribution for a clay class or a soil type. Andersson and Wiklert (1972) classified soil physical data on water retention capacity primarily according to clay content with a 5 % class width and secondarily in soil types. The same division has been made in the present processing of the data material, which concerns the pore space that contains plant-available water. It has been divided into four pore intervals. Intervals at limits of 30, 5, 0.6 and 0.2 μm have been selected so that differentiation can be made between important pore groups with regard to deformation. This grouping is in fair agreement with the classification of soil pores proposed by Brewer (1964). Instead of a pure pore size terminology proposed by Odén (1957), the present emphasis is now on a terminology according to function. Greenland (1977) proposes the term transmission pores instead of terms such as large pores or macropores. In this class the limit varies from 20 μm (Odén 1957) to 50 μm (Greenland 1977). In the present investigation the limit has been placed on pores $> 30 \mu\text{m}$ that correspond to a tension of 1 m water column. For pores $< 30 \mu\text{m}$ (or corresponding sizes) that contain plant-available water, Greenland proposes the term storage pores. The additional division of this part of the pore space, as done in the present investigation, also considers important functions. Thus, pressure from loads on the soil will influence the pore system approximately to the limit 5 μm . At 0.6 μm (50 m water column) the structural influence of other forces will also cease and the pore system will largely become dependant on the texture. This limit is also important from the function viewpoint. It divides a water volume in the pore space of decreased availability to the plant, but a volume which comprises a valuable reserve in situations of drought. Water retention studies in irrigation experiments indicate, however, that the pore space should be filled to this level if satisfactory growth is to be obtained.

Compaction vulnerability in relation to pore size distribution

As mentioned, the compaction vulnerability should be considered against the background of porosity and pore size distribution in the investigated soil

type. The soils studied in the compaction experiments had clay contents ranging from 5 to 85 % and are evenly distributed along the soil class scale. The parameters at the individual sampling sites are shown in four diagrams that show the compaction vulnerability as it is related in different ways to the pore space in the profile as a whole or in different layers. The decrease in porosity (n) with pressure applied (p) is given with the exponential function $n = a + b \cdot e^{-c \cdot p}$, where a , b and c are constants depending on the soil. The porosity, which at the start is equal to $a + b$, moves asymptotically with increased pressure towards the minimum porosity (a) that is characteristic for the soil. The value of the constant b is primarily dependant on the proportion of large pores or by the pore size distribution in general. The constant c gives the way in which the deformation is proceeding. The firmness of the soil skeleton is related to the tension in the pore space. In the present investigation the drainage has been retained in the interval 0.05-6.0 m water column, which is a common water content situation at, e.g., spring tillage. Profile data of porosity reductions following loading in the interval 0-800 kPa according to clay content are given in figs 5.25 and 5.26. As regards mechanical properties, a limit can be placed at 25 % clay content. At higher contents the clay particles dominate the mechanical properties of the soil. In the clay content range 25-90 %, the reduction of pore volume upon loading corresponds approximately to that part of the pore space that consists of large pores ($> 5 \mu\text{m}$). At clay contents below 25 % the friction between the particles in the soil is also decisive for the mechanical properties, whereby the large pores are only partly deformed within the tested load range.

A series of diagrams (figs 5.27-5.30) illustrate how the compaction influences that part of the pore space containing water available for uptake. In soils with friction properties this influence is slight but in clay soils 1/3 to 1/2 of the pore space for available water is deformed. As also the absolute amount of available water decreases with increased clay content, the amount remaining after compaction will be particularly small on heavy clay soils. In addition, the deformation will concern that part of the pore system which is decisive for drainage, aeration and root development.

Compaction is a complex event in the soil with influence not only on physical but also on chemical and biological properties. It influences the root environment and thus also different phases of crop growth and the final production. In order to understand and classify the "damage" to the soil structure resulting from heavy traffic or trafficking when the soil is in an unsuitable

state it is necessary to conduct studies of soil environment and growth conditions alongside the mechanical-physical measurements. By making use of the methods developed for inventories of the mechanical properties of arable soils attempts have also been made in the present study to measure and describe series of relationships such as pressure - pore size distribution - movement of water and air - root resistance and root development.

Chapter 6 contains reports of further investigations of naturally layered soil as regards the relationship between pressure and pore size distribution. Detailed studies of the pore size situation in soil samples indicates that the large pore system is primarily encountered. The compaction process implies reduction in the macro-pore proportion of the total porosity. By new formation of small pores when large pores are deformed some pore fractions will increase. For this reason, among others, it is difficult to state how deep in the pore system this change occurs. The limit also varies from soil to soil depending on the original pore size distribution. In the present investigation it has been found that pores $> 30 \mu\text{m}$ decrease strongly when subjected to compaction and that there are both deformation and redistribution effects in the pore interval $5\text{-}30 \mu\text{m}$. This limit is verified by other studies on naturally layered samples (Hartge 1965, Sommer 1975, Walczak 1977). Also investigations conducted by the author into the effect of compaction in situ under extremely heavy surface loads (Eriksson 1975/76) the same picture of the compaction process has been obtained. Reference here is also made to the investigations by Håkansson (1979). A further confirmation that the compaction involves the large pore system is found in the author's own investigation of pore space beneath two different tillage systems, with and without tractors. In the latter treatment the implements are winched over the plots. After about 10 years a situation of equilibrium has been reached in the top-soil that is characterized by a larger proportion of large pores, in this case $> 5 \mu\text{m}$, in the winched treatment. This treatment differs as regards the drawbar pull, drainage and tillage characteristics, carrying capacity, and yield. The yield difference can be traced directly to better root environment and root penetration in the winched treatment as well as indirectly to a poorer permeability in the tractor-tilled treatment, occasionally with damaging water saturation and water ponding. The different tillage methods have thus, lead to a considerable difference in function between the two profiles that can be traced, structurally to a difference in the large pore system.

Section 6 also gives a report on a comparison of calculated and measured degree of compaction for a defined surface load. The deformation at different

depths in the profile resulting from the application of pressure has been calculated on the basis of compressometer data on the compaction vulnerability. Fairly good agreement was found between calculated and measured porosity values. Similar calculation models have recently been proposed and tested by, among others, Blackwell and Soane (1981) and Gupta and Larsson (1982).

Section 7 contains a discussion of different aspects on soil aeration as a basis for judgements of the influence of compaction on soil ventilation. The oxygen situation in a soil depends both on the consumption of oxygen during the respiration of roots and soil organisms, and also on the supply of oxygen mainly through diffusion. Theoretical relationships for this have been prepared and provide the possibility to calculate the situations when a limiting oxygen situation may occur in a soil. This theory has been used here to form an oxygen balance diagram which provides a picture of the relationship between the factors that determine oxygen consumption in different types of soil. Of the two forms of gas transportation, diffusion and convection, diffusion is by far the most dominant in soil ventilation. However, there is a relationship between the two forms so that measurements of air permeability - that are easier to conduct - can be used in judgements of soil ventilation and the risk of hazardous oxygen situations. Very few investigations have considered this relationship. In the present study, the relationship between diffusion and air permeability has been calculated for a limited experimental material originally presented by Edling (1973). Using calculations of the oxygen balance, it has also been possible to classify the air permeability. In the author's own investigations in which permeability is used to show the influence of compaction on soil ventilation, the classification mentioned has been applied to indicate the air permeabilities that are critical for the oxygen supply. It should be observed that the measurements of both diffusion and air permeability are made with the sample in a drained condition. A suitable degree of drainage for a good dissolution in all degrees of compaction appears to be within 6.0 m water column. The analysis of the relationship between diffusion and air permeability indicates that decreased soil ventilation and deteriorated root environment can be expected at permeabilities lower than 200 cm/min. On the soils investigated this occurred in the pressure range 200-400 kPa.

Section 8 deals with the relationship between pressure and penetration resistance. The penetration capacity of the root has been studied intensely by different scientists. One approach has been to place root growth in relation to the soil's mechanical properties measured by means of a steel needle with the shape and size of a root tip. Such comparisons reveal that a steel pene-

trode is subjected to 3-5 times greater resistance than a root tip and that root growth ceases at a penetration resistance of 3000-5000 kPa. The root tip pressure can maximally amount to ca 1000 kPa. The author's own investigations in soil with different degrees of drainage and compaction show that the penetration resistance increases both due to the rigidity of the soil that occurs during drainage and also due to the deformation of the pore space due to the pressure. In the clay soil investigated from Ultuna, the limit value of 2000 kPa for moderate root resistance was exceeded by removing water in the soil to an extent corresponding to 6.0 m water column and/or a pressure above 200 kPa.

Section 9 presents methods whereby a direct picture is obtained of the root reaction to soil of different compaction degrees. Apart from an ocular opinion on root penetration, the method also provides a quantitative measure of root development through measurements of water uptake and shoot growth. Wheat was grown in soil cores with a diameter of 72 mm and a height of 25 mm that were compacted at pressures in the standardized stages up to 800 kPa. Both root patterns as well as data on plant length and water consumption indicate that there is a successive influence on the root environment when pressure is applied. At 200 kPa this influence has reached a relatively large negative effect. As in other function studies, 200 kPa appears to be a critical limit. Compaction and the growing of test plants have been done in two drainage situations, 0.05 m and 6.0 m water column. It was observed that root development and shoot growth was considerably poorer at the higher tension. This may to some extent be explained by the hardening of the soil, but also that the water released at 6.0 m water column is of great importance for the water supply to the roots in the initial phase.

In summary it can be stated that the purely soil mechanical studies in this investigation are complemented by the function studies. In order to obtain a total picture of the influence of agricultural machinery and vehicles on the soil, with effects on crop yields, it is necessary not only to analyse factors involving the soil environment but also to perform field experiments for synthesis of biology, technics and economy (Eriksson et al. 1974). When this has been accomplished it is possible to indicate alternatives for agriculture that are technically possible and economically advantageous. A number of measures must be considered in practice such as drainage, liming, fertilization, different measures of tillage and crop production, besides selection of the most suitable types and sizes of machinery, wheel equipment, machine

capacity, etc. The present study has to be seen as part of the evaluation of these alternatives. It will also be a base for further studies on the regeneration process in soil subjected to lasting compaction which must deal with structural damage and analysis of divergences from the normal equilibrium in the soil profile.

LITTERATUR

- Abdalla, A.M., Hettiaratchi, D.R.P. and Reece, A.R. 1969. The mechanics of root growth in granular media. *J. Agric. Engng Res.* 14, 236-248.
- Agricultural advisory council, 1970. Modern farming and the soil.. Ministry of Agriculture, Fisheries and Food. HMSO London. 119 s.
- Andersson, S. 1953. Markfysikaliska undersökningar i odlad jord. II-V. Om markens permeabilitet. *Grundförbättring*, årg. 6, nr 1-4, 28-45, 74-89, 160-176, 217-234.
- Andersson, S. 1955. Markfysikaliska undersökningar i odlad jord. VIII. En experimentell metod. *Grundförbättring*, 8, specialnr 2. 98 s.
- Andersson, S. 1969. Markfysikaliska undersökningar i odlad jord. XIX. Teoretiska modellstudier av kapillära systems k-värden som funktioner av porstorleksfördelning, bindningstryck och vattenhalt. *Grundförbättring*, 4, 143-154.
- Andersson, S. och Håkansson, I. 1963. Markfysikaliska undersökningar i odlad jord. XIV. Om ett par nya metoder att bestämma markytans mikrotopografi, dess höjdförändringar och matjordens porositet. *Grundförbättring*, 16, 1-26.
- Andersson, S. och Håkansson, I. 1966. Markfysikaliska undersökningar i odlad jord. XVI. Strukturodynamiken i matjorden. En fältstudie. *Grundförbättring*, 19, 191-228.
- Andersson, S. och Wiklert, P. 1960. Markfysikaliska undersökningar i odlad jord. XI. Studier av några markprofiler på Ultuna egendom. *Grundförbättring*, 12(1959), spec.nr 3. 195 s.
- Andersson, S. och Wiklert, P. 1970. Markfysikaliska undersökningar i odlad jord. XX. Studier av några markprofiler i Norrland. *Grundförbättring*, 23, 3-76.
- Andersson, S. och Wiklert, P. 1972. Markfysikaliska undersökningar i odlad jord. XXIII. Om de vattenhållande egenskaperna hos svenska jordarter. *Grundförbättring*, 25, 1972: 2-3, 53-143.
- Bakker, J.W. and Hidding, A.P. 1970. The influence of soil structure and air content on gas diffusion in soils. *Neth. Journ. Agrc. Sci* 18, 37-48.
- Bakker, J.W., Dasberg, S. and Verhaegh, W.B. 1980. Effect of soil structure on diffusion coefficient and air permeability of soils (under tryckning).
- Barley, K.P. 1970. The configuration of the root system in relation to nutrient uptake. *Advances in agronomy* 22, 159-201.
- Barley, K.P., Farrell, D.A. and Greacen, E.L. 1965. The influence of soil strength on the penetration of a loam by plant roots. *Austral. Journ. Soil Res.* 3, 69-79.
- Barley, K.P. and Greacen, E.L. 1967. Mechanical resistance as a soil factor influencing the growth of roots and underground shoots. *Advances in Agron.* 19, 1-43.
- Barnes, K.K. et al. (Organ. Comm.) 1971. Compaction of Agricultural Soils. *Am. Soc. Agric. Eng., St. Joseph, MI*, 471 pp.
- Berglund, G. 1961. Om orsakerna till skördeskadorna hösten 1960 i Uppsala län. *Grundförbättring*, 14, 1-16.

- Bishop, A.W. 1955. The principle of effective stress. Tekn. Ukeblad 106.39, 859-863.
- Blackwell, P.S. and Soane, B.D. 1981. A method of predicting bulk density changes in field soils resulting from compaction by agricultural traffic. Journal of Soil Science, 32, 51-65.
- Bouma, J. 1969. Microstructure and stability of two sandy loam soils with different soil management. Agricultural Research Reports 724. 110 s. Pudoc, Wageningen.
- Bouma, J. 1981. Comments on "Micro-, Meso- and Macroporosity of Soil". Soil Sci. Soc. Am. J., vol. 45, 1244-1245.
- Bredberg, C.J. und Wästerlund, I. 1983. Fahrzeuge und Schäden auf Baumwurzeln und Boden. Forstw. Cbl 101(H1) under tryckning.
- Brewer, R. 1964. Fabric and Mineral Analysis of Soils. New York.
- Brinch Hansen, J. 1961. A model law for simultaneous primary and secondary consolidation. Danmarks Geotekniska institut Bulletin 13, 1-4.
- Champion, R.A. and Barley, K.P. 1969. Penetration of clay by root hairs. Soil Sci. 108, 402-407.
- Chancellor, W.J. 1976. Compaction of soil by agricultural equipment. Bull. 1881. Div. Agric. Sci. Univ. California, Davis, 53 pp.
- Currie, J.A. 1960a. Gaseous diffusion in porous media. Part 1 - A non steady state method. Brit. Journ. Appl. Phys. 11, 314-317.
- Currie, J.A. 1960b. Gaseous diffusion in porous media. Part 2 - Dry granular materials. Brit. Journ. Appl. Phys. 11, 318-324.
- Currie, J.A. 1960c. Gaseous diffusion in porous media. Part 3 - Wet granular materials. Brit. Journ. Appl. Phys. 12, 275-281.
- Danfors, B. 1970. Jord - fordon och maskiner. Hjultrycket och risken för skadlig packning. Jordbrukstekniska institutet, Medd, 333. 53 s., Uppsala.
- Danfors, B. 1974. Packning i alven. Jordbrukstekniska institutet, Specialmedd. 524. 91 s., Uppsala.
- Eavis, B.W. 1972. Soil physical conditions affecting seedling root growth. Plant and Soil 36, 613-632.
- Edling, P. 1973. Några aspekter på jordluften - en undersökning av dess volym och omsättningsmöjligheter. Licentiatavhandling i Lantbrukets hydroteknik, Lantbrukshögskolan, Uppsala. 125 s.
- Eriksson, J. 1957. Dräneringen och bärkraften i åkermark. Jord-gröda-djur, Årsbok 1957, 33-46.
- Eriksson, J. 1960. Marken och maskinerna. Grundförbättring, 13, 149-158.
- Eriksson, J. 1968. CADU - ett utvecklingsprojekt i Etiopien. Odlingsbetingelser och odlingsproblem. Grundförbättring, 21: 4, 165-175.
- Eriksson, J. 1975/76. Influence of extremely heavy traffic on clay soil. Grundförbättring, 27, 33-51.
- Eriksson, J., Håkansson, I. och Danfors, B. 1974. Jordpackning - markstruktur - gröda. Jordbrukstekniska institutet, Medd. 354, 82 s., Uppsala.
- FAO, 1979. A provisional methodology for soil degradation assessment. Rom, 84 s.
- Forsblad, L. 1965. Investigations of soil compaction by vibration. Acta Polytechnica Scandinavica nr 34. 185 s.

- Gill, W.R. and Bolt, G.H. 1955. Pfeffer's studies of the root growth pressures exerted by plants. *Agron. J.* 47, 166-168.
- Grable, A.R. 1971. Effects of compaction on content and transmission of air soils. I: Barnes, K.K. et al. eds. *Compaction of Agricultural Soils*. pp 154-164. Am. Soc. Agric. Eng., St. Joseph, Mich.
- Greacen, E.L., Barley, K.P. and Farrell, D.A. 1968. The mechanics of root growth in soils with particular reference to the implications for root distribution. *Proc. 15th Easter School in Agr. Sci.*, Univ. Nottingham, 256-269.
- Greenland, D.J. 1977. Soil damage by intensive arable cultivations: temporary or permanent? *Phil. Trans. R. Soc. Land. B.* 281, 193-208.
- Gupta, S.C. and Larsson, W.E. 1982. Modeling Soil Mechanical Behavior during Tillage. In: *Predicting Tillage Effects on Soil Physical Properties and Processes*. Madison, 151-178.
- Hall, D.G.M., Reeve, M.J., Thomasson, A.J., Wright, V.F. 1977. Water retention, porosity and density of field soils. Soil Survey, Rothamsted Experimental Station, Technical monograph no 9. 75 s.
- Hansbo, S. 1975. *Jordmateriallära*. Stockholm, 218 s.
- Harris, W.L. 1971. The soil compaction process. I: Barnes, K.K. et al. *Compaction of Agricultural Soils*. Am. Soc. Agric. Eng., St. Joseph, MI, 431-458.
- Hartge, K.H. 1965. Formen und Verbreitung der im Boden vorkommenden Verdichtungsarten. *Z. f. Pflanzenern., Düng. und Bodenkunde* 108, 7-18.
- Heinonen, R. 1960. Das Volumgewicht als Kennzeichen der "normalen" Bodenstruktur. *J. Sci. Agric. Soc. Finland* 32, 81-87.
- Heinonen, R. 1979. The notion of "Normal Bulk Density" in arable soils. *Proc. 8th Conf. Int. Soil Tillage Res. Organ.*, Stuttgart 1, 87-90.
- Håkansson, A. 1960. Studier av dikesdjupets inverkan på grundvattensstånd, skördeavkastning, markens upptorkning och bärkraft. *Grundförbättring*, 13, 171-292.
- Håkansson, A. 1961. Dräneringsförsök med olika dikesavstånd. *Grundförbättring* 14, 4-98.
- Håkansson, I. 1966. Försök med olika packningsgrader i matjorden och alvens översta del. *Grundförbättring*, 19, 281-332.
- Håkansson, I. 1979. Försök med jordpackning vid hög axelbelastning. Markundersökningar 1-2 år efter försökens anläggande. *Rapporter från jordbearbetningsavdelningen, SLU, nr 57*. 15 s.
- Håkansson, I. ed. 1980. Working group on soil compaction by vehicles with high axle load. Report of meeting in Uppsala 1980. Rapport nr 60 från jordbearbetningsavdelningen, Inst. för Markvetenskap, Sveriges Lantbruksuniversitet. 56 s.
- Janbu, N. 1970. *Grunnlag i geoteknikk*. 496 s. Tapir forlag, Trondheim.
- Kemper, B. and Derpsch, R. 1979. Studies on the susceptibility of soils to erosion and on soil protection methods in Parana/Brazil. Proceedings of the International Soil Tillage Research Organization, ISTR0, 8th Conference, University of Hohenheim, 1, 165-171.
- Ke'zdi, A. 1969. *Handbuch der Bodenmechanik*. Band 1. Bodenphysik. Verlag für Bauwesen, Berlin.

- Ke'zdi, A. 1973. Handbuch der Bodenmechanik. Band 3. Bodenmechanisches Versuchswesen. Verlag für Bauwesen, Berlin. 274 s.
- Kimball, B.A. and Lemon, E.R. 1971. Air turbulence effects upon soil gas exchange. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 35, 16-21.
- Kimball, B.A. and Lemon, E.R. 1972. Theory of soil air movement due to pressure fluctuations. *Agricultural Meteorology*, 9, 163-181.
- Kinze, M. 1966. Spannungen und Verformungen bei der statischen Bodenverdichtung. *Mitteilungen des Instituts für Wasserwirtschaft*, 26, 74 s.
- Koolen, A.J. 1974. A method for soil compactibility determination. *J. agric. Engng Res.* 19, 271-278.
- Ledin, S. 1981. Physical and Micromorphological Studies of the Effects of Lime on a Clay Soil. Uppsala. 136 s.
- Odén, S. 1957. Förslag till klassifikation av markens porer. *Kungl. Skogs- och Lantbruksakademiens tidskrift*, 96, 297-313.
- Olvegård, P. 1965. Stensfältsförsöket. *Skaraborgs Läns Hushållningssällskaps Tidning* nr 6, 2 s.
- Olvegård, P. 1969. Vinsch i stället för traktor ger ökad skörd. *Sådd och Skörd*, nr 2, 62-66.
- Penman, H.L. 1940. Gas and vapour movements in the soil. I. The diffusion of vapours through porous solids. *Journ. Agric. Sci.* 30, 437-462.
- Persson, L. 1979. Tryckluftsdömetrar för statiska belastningsprov. Beskrivning av konstruktion, metodik och handhavande. Stencil. Avd. för lantbrukets hydroteknik, Markvetenskap, SLU, Uppsala, 43 s.
- Pusch, R. 1967. A technique for investigation of clay microstructure. *Journal de Microscopie*, Vol. 6, 963-986. *Bygghforskningen*, Rapport 28/68, 23 s.
- Renger, M. 1971. Die Ermittlung der Porengrößenverteilung aus der Körnung, dem Gehalt an organischer Substanz und der Lagerungsdichte. *Z. Pflernähr. Bodenk.* 130, 53-67.
- Romell, L.G. 1922. Luftväxlingen i marken som ekologisk faktor. *Medd. Stat. Skogsförsöksanst.* 19, 131-359.
- Russel, E.J. and Appleyard, A. 1915. The atmosphere of the soil, its composition and the causes of variation. *Journ. Agric. Sci.* 7, 1-48.
- Soane, B.D. 1975. Studies on some soil physical properties in relation to cultivations and traffic. In: *Soil Physical Conditions and Crop Growth*. *Min. Agric. Fish. Food, Tech. Bull.* 29, HMSO, pp 160-183.
- Soane, B.D., Blackwell, P.S., Dickson, J.W. and Painter, D.J. 1980/81. Compaction by agricultural vehicles: A review. I. Soil and wheel characteristics. *Soil and Tillage Research*, 1, 207-237.
- Soane, B.D., Blackwell, P.S., Dickson, J.W. and Painter, D.J. 1980/81. Compaction by agricultural vehicles: A review. II. Compaction under types and other running gear. *Soil and Tillage Research*, 1, 373-400.
- Soane, B.D., Dickson, J.W. and Campbell, D.J. 1982. Compaction by agricultural vehicles. A review. III. Incidence and control of compaction in crop production. *Soil and Tillage Research*, 2, 3-36.
- Sommer, C. 1975. Die Verdichtungsempfindlichkeit zweier Ackerböden. Ein Beitrag zum Verhalten von Böden unter vertikaler Belastung im Saugspannungsbereich bis pF 2.7. *Landbauforschung Völkenrode*, Sonderheft 26. 179 s.

- Sommer, C., Stoinev, K., Altenmüller, H.I. 1972. Das Verhalten vier verschiedener Modellböden unter vertikaler Belastung. *Landbauforschung Völknerode*, 22, heft 1, 45-56.
- Söhne, W. 1952. Die Verformbarkeit des Ackerbodens. *Grundlagen d. Landtechnik* 3, 51-59.
- Söhne, W. 1953. a) Druckverteilung und Bodenverformung unter Schlepperreifen. b) Reibung und Kohäsion von Ackerböden. *Grundlagen d. Landtechnik* 5, 49-80.
- Tadesse, K. 1975. Radish root growth under mechanical stress. Dr thesis (unpublished). Colorado State University, Fort Collins, Colorado. 115 s.
- Taylor, H.M. and Gardner, H.R. 1963. Penetration of cotton seedling taproots as influenced by bulk density, moisture content and strength of soil. *Soil Sci.* 96, 153-156.
- Terzaghi, K.v. 1925. *Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer Grundlage*. F. Deuticke, Leipzig und Wien.
- Trouse, A.C. and Humbert, R.P. 1961. Some effects of soil compaction on the development of sugar cane roots. *Soil Sci.* 91(3); 208-217.
- Vanden Berg, G.E. 1962. Requirements for a soil mechanics. *Transactions of the ASAE* 4, 234-238.
- Voorhees, W.B. 1977. Soil compaction: how it influences moisture, temperature, yield, root growth. *Crops Soils Mag.*, 29, 7-10.
- Walczak, R. 1977. Model investigations of water binding energy in soils of different compaction, 11-41. I The basic problems of soil environment. *Polska Vetenskapsakademien*, nr 197, Warszawa.
- Wesseling, J. 1962. Some solutions of the steady state diffusion of carbon dioxide through soils. *Neth. J. agric. Sci.* 10, 109-117.
- Whiteley, G.M. and Dexter, A.R. 1981. The dependence of soil penetrometer pressure on penetrometer size. *J. agric. Engng Res.* 26, 467-476.
- Whiteley, G.M., Utomo, W.H. and Dexter, A.R. 1981. A comparison of penetrometer pressures and the pressures exerted by roots. *Plant and Soil* 61, 351-364.
- Wijk, A.L.M. van, 1980. Playing conditions of grass sports fields. A soil technological study on effectuation and maintaining adequate playing conditions of grass sports fields. Centre for Agricultural Publishing and Documentation. Wageningen. 124 s.
- Wiklert, P. 1961. Om sambandet mellan markstruktur, rotutveckling och upp-torkningsförlopp. *Grundförbättring*, 14, 221-239.
- Wilun, Z. and Starzewski, K. 1972. Soil mechanics in foundation engineering. Vol. 1, Properties of soils and site investigations. London, 252 s.

Förteckning över utgivna häften i publikationsserien

SVERIGES LANTBRUKSUNIVERSITET, UPPSALA. INSTITUTIONEN FÖR MARKVETENSKAP.
AVDELNINGEN FÖR LANTBRUKETS HYDROTEKNIK. RAPPORTER.

- 108 Berglund, G., Håkansson, A. & Eriksson, J. 1978. Om dikningsintensiteten vid dränering av åkerjord. Resultat av fältförsök med olika dikesavstånd. IX: Västernorrlands, Jämtlands, Västerbottens och Norrbottens län. 102 bl.
- 109 Bjerketorp, A. & Klingspor, P. 1978 (1982). Inventering av avrinningen inom regioner med stor jordbruksbevattning. Faktaredovisning. 1: Kalmar län. 66 s. (109a. Korrigerat nytryck 1982. 66 s).
- 110 Lundegrén, J & Nilsson, S. 1978. Bevattningssamverkan. Förutsättningar och olika associationsformer. 26 bl.
- 111 Berglund, G. m.fl. 1978. Resultat av 1977 års fältförsök avseende täckdikning, övrig grundförbättring och bevattning. 19+23+56 bl.
- 112 Forsling, A. & Borgblad, M. 1978. Konflikten mellan jordbruket och naturvärden i markavvattningsfrågor. 57 bl.
- 113 Linnér, H. 1978. Vatten- och kvävehushållningen vid bevattning av en sandjord. 16 bl.
- 114 Ingvarsson, A. 1978. Bevattningsförsök inom trädgårdsområdet i Norden. Sammanfattning av försöksresultat publicerade t.o.m. 1977/78. 68 bl.
- 115 Ingvarsson, A. 1978. Bevattning i fältmässig trädgårdsodling - Teknik och ekonomi. 43 bl.
- 116 Berglund, G. 1978. Frosthävningens inverkan på dräneringsledningar. 57 bl.
- 117 Berglund, G. 1979. De odlade jordarna i Uppsala län, deras geografiska fördelning och fördelning på jordarter. 40 bl.
- 118 Berglund, G. m.fl. 1979. Resultat av 1978 års fältförsök avseende täckdikning, övrig grundförbättring och bevattning. 16+26+56 bl.
- 119 Valegård, A. & Persson, R. 1981. Optimering av större ledningssystem för bevattning. 40 s. + 4 bl.
- 120 Berglund, G. m.fl. 1980. Resultat av 1979 års fältförsök avseende täckdikning, övrig grundförbättring och bevattning. 18+27+48 bl.
- 121A Bjerketorp, A. 1982. Inventering av avrinningen inom regioner med stor jordbruksbevattning. 2A: Deskriptiv behandling av grunddata från Kristianstads län.
- 121B Bjerketorp, A. 1982. Inventering av avrinningen inom regioner med stor jordbruksbevattning. 2B: Resultat och slutsatser avseende Kristianstads län.
- 122 Berglund, G., Håkansson, A. & Eriksson, J. 1980. Om dikningsintensiteten vid dränering av åkerjord. Resultat av fältförsök med olika dikesavstånd. III: Jönköpings, Kronobergs, Kalmar och Gotlands län. 68 bl.
- 123 Johansson, W. 1980. Bevattning och kvävegödsling till gräsvall. 83 bl.
- 124 Heiwall, H. 1980. Underbevattning. Studier av grödans tillväxt och vattenförbrukning vid olika djup till grundvattenytan på en sandig grovmo. 17 bl.
- 125 Berglund, K. 1982. Beskrivning av fem myrjordsprofiler från Gotland. 55 sid.