

Siltjordars egenskaper

- Silt som konstruktionsmaterial
- Bestämning av geotekniska egenskaper

SVEN KNUTSSON

ROLF LARSSON

MARIUS TREMBLAY

ANNA-LENA ÖBERG-HÖGSTA



STATENS GEOTEKNISKA INSTITUT
SWEDISH GEOTECHNICAL INSTITUTE

Information 16

Siltjordars egenskaper.

- Silt som konstruktionsmaterial
- Bestämning av geotekniska egenskaper

Sven Knutsson
Rolf Larsson
Marius Tremblay
Anna-Lena Öberg-Högsta

Information	Statens geotekniska institut (SGI) 581 93 Linköping
Beställning	SGI Litteraturtjänsten Tel: 013-20 18 04 Fax: 013-20 19 09 E-post: info@swedgeo.se Internet: www.swedgeo.se
ISSN	0281-7578
ISRN	SGI-INF--98/16--SE
Projektnummer SGI	19710501
Redigering och layout	SGI
Upplaga	800
Tryckeri	Roland Offset AB, Linköping, oktober 1998

Förord

I denna informationsskrift beskrivs hur man bör ta hänsyn till de speciella geotekniska aspekterna på siltjordars egenskaper vid undersökning, projektering och byggande. Skriften utgör en sammanfattning av resultat som erhållits från forskning om egenskaper i siltjordar och syftar till att introducera dessa kunskaper och förbättra praxis inom den geotekniska verksamheten. Syftet är inte att ge en heltäckande bild av alla geotekniska aspekter på siltjordar, utan att komplettera och uppdatera delar av den information som finns i andra handböcker och publikationer. Skriften vänder sig främst till geotekniker och andra som i sin verksamhet ställs inför problem med siltjordar och bestämning av deras tekniska egenskaper.

Silt var tidigare ett ur forskningshänseende relativt styvmoderligt behandlat material, trots att det förekommer över hela Sverige. Detta berodde bland annat på svårigheter vid provtagning och provning samt att man hjälpligt klarat sig genom att använda metoder som främst utvecklats för lera och sand. Klara regler för vilka metoder som bör användas i olika fall och hur resultaten bör tolkas har dock saknats.

Undersökningar av silts egenskaper har tidigare främst bedrivits i Tyskland, Finland och Norge. I Sverige fick siltforskningen ett uppsving efter tillkomsten av den tekniska högskolan i Luleå. På senare tid har siltjord börjat användas i större utsträckning i vägbanor och andra fyllningar och regler och anvisningar för hur detta kan göras har utformats av Vägverket i VÄG 94. Större forskningsprojekt inriktade på olika aspekter på siltjordars egenskaper och beteende har också genomförts vid Chalmers Tekniska Högskola och SGI.

Under senare år har flera avhandlingar/rapporter som behandlar olika aspekter på undersökningar och dimensionering i siltjordar presenterats. Dessa skrifter riktar sig främst till forskarsamhället. Rapporterna innehåller många direkt användbara resultat och dessutom praktiska rekommendationer för hur undersökningar och dimensioneringar bör utföras och vad man därvid bör se upp med. Några av dessa aspekter har presenterats i mer lättillgängliga artiklar, men i stora delar fördras en visst arbete för att hitta de direkt praktiskt tillämpliga resultaten och metoderna. I denna skrift ges en översiktlig beskrivning av vad man bör ta hänsyn till vid byggande i siltjord och en syntes av de olika forskningsprojekten i form av rekommendationer för hur olika undersökningar, bedömningar och beräkningar bör utföras.

Skriften har granskats av *Ove Magnusson* Skanska Teknik och Luleå Tekniska Universitet, *Ulf Bergdahl*, SGI, *Inge Brorsson*, SGI och *Peter Carlsten*, SGI.

Dessa personer har också lämnat värdefulla synpunkter och bidrag till innehållet.

Illustrationer har utförts av Robert Källgren.

Linköping i augusti 1998

Det har saknats klara regler för vilka metoder som bör användas för silt och hur resultaten bör tolkas.

Innehållsförteckning

Förord

Om innehållet, 6

1. Silt – förekomst och speciella egenskaper, 7

- 1.1 Var finns silt?
- 1.2 Silt – en ”mellanjord”
- 1.3 Tjälproblem
- 1.4 Känslighet för vibrationer och skakningar
- 1.5 Packning
- 1.6 Stabilitet och bärighet i bankar
- 1.7 Stabilitet i slänter
- 1.8 Erosion och flytbenägenhet
- 1.9 Stabilitet och länshållning i schakter
- 1.10 Bärighet och sättningar
- 1.11 Pålning
- 1.12 Förstärkning av siltjord

2. Grundvattenförhållanden och utvärdering av portryck, 21

- 2.1 Bildning och förekomst av grundvatten
- 2.2 Portrycksfördelning
- 2.3 Portrycksvariationer
- 2.4 Utvärdering av effektiva negativa portryck
- 2.5 Bedömning av relevanta portryck vid dimensionering

3. Tjälproblematik, 32

- 3.1 Allmänt
- 3.2 Tjäl djup
- 3.3 Tjällyftning
- 3.4 Tjällossning

4. Fältundersökning, 36

- 4.1 Förutsättningar för fältundersökning av silt
- 4.2 Arbetsgång
- 4.3 Sondering
- 4.4 Vingförsök
- 4.5 Dilatometerförsök
- 4.6 Pressometerförsök
- 4.7 Portrycksmätning
- 4.8 Provtagning

5. Laboratorieprovning, 48

- 5.1 Allmänt
- 5.2 Arbetsgång
- 5.3 Klassificering
- 5.4 Rutinundersökning
- 5.5 Bestämning av vattenförande och vattenhållande egenskaper
- 5.6 Odränerad skjuvhållfasthet
- 5.7 Dränerad skjuvhållfasthet
- 5.8 Hållfasthet i icke-vattenmättad jord
- 5.9 Kompressionsegenskaper
- 5.10 Mätning av negativa portryck

6. Beräkning av släntstabilitet och bärighet för fundament, 58

- 6.1 Släntstabilitetsanalys med hänsyn till negativa portryck
- 6.2 Beräkning av bärighet för fundament

7. Beräkning av sättningar, 61

- 7.1 Beräkning med spänningsfördelning enligt elasticitetsteori och moduler
- 7.2 Beräkning på basis av pressometerförsök
- 7.3 Inverkan av tid och cyklisk belastning

Appendix, 65

- Beräkning av släntstabilitet med hänsyn till negativa portryck

Om innehållet

Skriften ger direkt användbar information om hur siltjordar uppträder och hur geotekniska undersökningar och beräkningar bör göras.

Hur är skriften upplagd och vilka frågeställningar behandlas?

Skriften ger direkt användbar information om hur siltjordar uppträder och hur geotekniska undersökningar och beräkningar bör göras. Den är främst baserad på resultat från författarnas forskning. Informationsskriften skall användas som komplement till tidigare publicerade handböcker. I slutet av varje kapitel anges sådan litteratur, som kan ge fördjupad och kompletterande kunskap.

I skriften ges först en allmän översikt av olika problemställningar i siltjord och hur man kan komma tillrätta med dem. Problem i siltjord är starkt förbundna med vatten. I skriften beskrivs därför grundvattenbildning och olika grundvattensituationer i silt liksom av de olika processerna i samband med tjälning och tjällossning.

Därefter redovisas mer detaljerat rekommendationer för hur undersökningar i fält och laboratorium bör utföras och tolkas med den teknik och de erfarenheter som utvecklats under senare år. Här beskrivs också de nya metoder som tagits fram för mätning och empirisk uppskattning av negativa portryck, som ofta har en stor betydelse i siltjordar. Därefter ges råd för val av dimensionerande portryck i olika situationer.

Skriften avslutas med rekommendationer för hur stabilitet och bärrighet kan beräknas med hänsyn till negativa portryck samt hur sättningar kan beräknas på basis av moduler som utvärderats ur olika försöksresultat.

Vem har nytta av skriften?

Skriften ger råd och information om många av de problemställningar som man möter vid planering och utförande av olika anläggningar eller markarbeten i siltområden, liksom för hur undersökningar och dimensionering bör utföras. Den vänder sig därför främst till dig som utför sådana uppgifter liksom till dem som beställer, utför och utvärderar geotekniska undersökningar samt till dem som utför de geotekniska beräkningarna.

1. Silt – förekomst och speciella egenskaper

Silt

- förekommer över hela landet
- är en "mellanjord" mellan lera och sand som i många fall medför speciella problem
- ställer speciella krav på undersökning i fält och på laboratorium
- är tjälfarlig, men problemen kan ofta byggas bort med rätt teknik
- är i lös lagring mycket känslig för vibrationer
- är kompressibel men kan förbelastas och förstärkas
- ställer speciella krav vid packning
- har hållfasthet, stabilitet och bärighet som är mycket beroende av grundvattensituationen
- är mycket erosionskänsligt
- kräver ofta länshållning och grundvattensänkning med speciella metoder vid schaktning
- kan medföra s.k. falska stopp vid påslagning

1.1 Var finns silt?

Silt förekommer i stor utsträckning över hela Sverige, dels som jordart, dels som en fraktion i blandkorniga jordar. Ren silt är som regel en sedimentär jordart som avsatts i svagt strömmande vatten. Den förekommer, med undantag för högt belägna issjöar, under högsta kustlinjen i randen av isälvsavlagringar, runt forna issjöar och som sväm- och svallsediment.

Silt i tjockare avlagringar är vanlig längs Norrlands kust och älvdalar, i Svealands och Småländska höglandets älvdalar samt runt Vänern och Mälaren. I övriga delar av landet finns omfattande lokala siltsediment runt forna isälvar och issjöar, svall- och svämsediment samt lager och skikt av silt i sand- och leravlagringar.

En exakt utbredning av siltsedimenten är svår att ange. På geologiska kartor anges oftast de finkorniga sedimenten silt och lera tillsammans, *Fig. 1.1*. Sediment av silt och lera är vanligtvis mer eller mindre växellagrade. Jordprofiler med lera i södra Sverige innehåller ofta siltskikt, vilka normalt blir mer frekventa i bottenlagren. Måktiga siltavlagringar

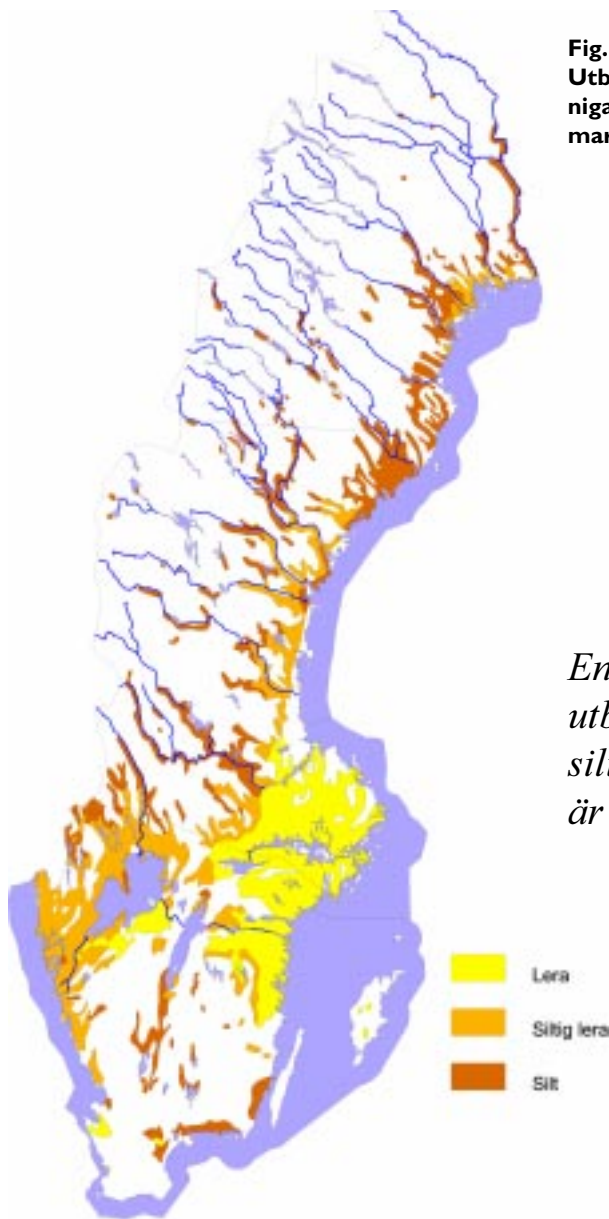


Fig. 1.1
Utbredning av finkorniga jordar i åkermarken. (1)

En exakt utbredning av siltsedimenten är svår att ange.

innehåller ofta skikt av lerig silt eller siltig lera och siltsedimenten i norra Sveriges älvdalar underlagras ofta av lera. I stora drag kan sägas att i de finkorniga sedimenten dominerar leran söder om en linje mellan Strömstad och Gävle medan silten dominerar norr därom. Stora lokala variationer kan dock förekomma på grund av olika faktorer, som främst är relaterade till isavsmältningen.

Siltavlagringar är oftast skiktade eller varviga, även inom partier utan inslag av ler- eller sandskikt. Den detaljerade jordlagerföljden och grundvattenförhållandena kan ha stor betydelse för de problem som kan uppstå, såväl vid grundläggningsarbeten och belastning som vid tjälning och upptining. Jordlagerföljden är också styrande för vilka parametrar och metoder som bör användas vid undersökningar och dimensionering.

I främst norra Sveriges kustland förekommer *sulfidsilt*, lokalt kallad svartmocka. Dess egenskaper är starkt beroende av ingående halter av järnsulfid, organisk substans och ler.

Siltmorän är Sveriges vanligaste moräntyp, främst inom områden med berggrund av sandsten.

1.2 Silt - en "mellanjord"

Silt är en jord som när det gäller kornstorlek och sammansättning befinner sig mellan lera och sand.

- **Kohesionsjord** (lera) består av mycket små partiklar av lermineral. I ett kortare tidsperspektiv betraktas kohesionsjord som ett tätt material där hållfastheten kan beskrivas som ett kohesionsvärde, som är oberoende av spänningsnivån. Å andra sidan är strukturen oftast så öppen att materialet är starkt kompressibelt i ett längre tidsperspektiv, där porövertryck i materialet kan utjämnas trots den låga permeabiliteten. Hållfasthets- och deformationsegenskaper relateras till jordens spänningshistoria (förkonsolideringstryck och överkonsolideringskvot). Kapillariteten är mycket hög och bortsett från torrskorpelera och fasta lermoräner är lera som regel helt vattenmättad.
- **Friktionsjord** (sand och grövre jord) består av större korn av bergartsmineral. Kapillariteten är låg och vattenmättnadsgraden ovan den fria grundvattenytan är låg, dvs. friktionsjorden är här endast naturfuktig. Friktionsjord är så permeabel att man för de flesta belast-

ningsfall kan anta att inga portrycksförändringar uppstår vid spänningsändringar. Hållfastheten kan uttryckas med en friktionsvinkel och är avhängig av spänningsnivån i jorden. Strukturen varierar med lagringstätheten, men kompressibiliteten är generellt låg i jämförelse med lera. Kompressionsegenskaperna och friktionsvinkeln relateras främst till materialets lagringstäthet.

- **Silt** utgör med avseende på kornstorlek, kapillaritet, permeabilitet, kompressibilitet och mineralsammansättning en gradvis övergång mellan kohesionsjord och friktionsjord och kallas ofta *mellanjord*. Typiska materialegenskaper framgår av Fig. 1.2. Ur flera andra aspekter kan man också anlägga detta synsätt, t.ex. vad beträffar storleken av sättningar och deras utveckling med tiden. På grund av jordens låga permeabilitet uppstår ofta en påtaglig fördröjning innan porövertryck utjämnats och sättningar utbildats. Denna är dock avsevärt mindre än motsvarande fördröjning i lera.

Ur flera andra aspekter utgör silt ett extremt material som medför speciella problem. Detta beror i huvudsak på att materialet är mycket känsligt för vatten. Silt är dels erosionsbenägen, dels mycket känslig för vatteninnehållet och portryckssituationen i jordprofilen samtidigt som dessa faktorer snabbt kan ändras.

Detta innebär att särskild uppmärksamhet erfordras vid undersökning av silts egenskaper i fält och på laboratorium. Vid utvärdering av försöksresultaten måste man dessutom ta hänsyn till särskilda aspekter och faktorer. Det är väsentligt att värdera hur materialet uppträder under försöket och den valda metodens tillämplighet. Man bör vara försiktig med att direkt använda metoder avpassade för kohesions- eller friktionsjord och eventuellt applicera en empirisk korrektionsfaktor för silt.

Undersökning av silt i fält och på laboratorium beskrivs närmare i kapitel 4 respektive kapitel 5.

Silt är ett extremt material med speciella problem.

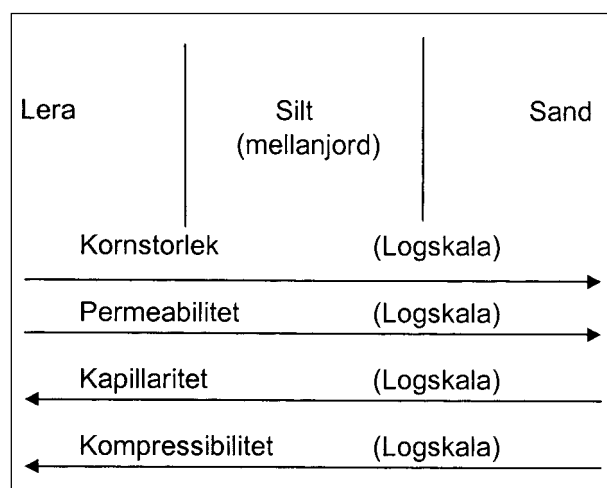


Fig. 1.2
Silt som mellanjord mellan lera och sand.

1.3 Tjälproblem

Enskilda jordarters benägenhet för tjällyftning uttrycks traditionellt genom indelning i tjälfarlighetsklasser, (eller tjälfarlighetsgrupper). Siltjordar är extremt benägna för tjällyftning, med åtföljande bärighetsförlust och flytbenägenhet vid upptining. Den högsta (känsligaste) tjälfarlighetsklassen utgörs helt av siltjordar med potentiell risk för stor tjällyftning på grund av stor vattenuppsugning och bildande av islinser, med påföljande uppluckring och instabilitet vid upptining. Tjälningssituationen behandlas närmare i kapitel 3.

En naturlig jordprofil med silt behöver emellertid inte nödvändigtvis ge upphov till tjälproblem. Vid byggande på och med silt kan en stor del av problemen elimineras med lämpliga kombinationer av dränering och/eller isolering.

1.4 Känslighet för vibrationer och skakningar

I löst lagrad vattenmättad silt finns risk för strukturell kollaps och total hållfasthetsnedsättning, *liquefaction*, vid t.ex. hastig cyklisk belastning. Löst lagrad grovsilt utgör tillsammans med finsand i detta sammanhang de farligaste materialen. Mycket mäktiga avlagringar av silt och finsand har avsatts i bland annat hav och stora insjöar, utanför flodmynningar och i deras deltan samt i form av svallsediment. Dessa kan vara mycket löst lagrade och problem med liquefaction kan uppstå i samband med hastiga laständringar och skakningar. En lokal strukturell kollaps kan snabbt sprida sig och exempel finns på mycket stora skred i flytbenägen jord, främst i form av undervattensskred. De största problemen uppstår normalt i jordbävningsdrabbade områden, men liknande och ibland dramatiska effekter kan fås vid sprängning och andra måttligare vibrationer samt vid vågbelastning av konstruktioner i havet eller vid kuster.

Lager och skikt av silt som är inbäddade i eller under lera kan vara mycket löst lagrade och risken för flytjordsbeteende ökar på grund av instängningen mellan lager av tätare jord. Bedömning av hållfasthetsegenskaper i sådana skikt är svår.

Ett speciellt problem utgörs av fyllningar av siltjord som lagts ut i fruset tillstånd, eller som icke vattenmättade klumpar som sedan inte packats. Vid upptining och vattenmättnings kan dessa material befinna sig i en mycket lös

lagring. En liten yttre påverkan kan då utlösa en total kollaps av materialet, som då på ett ögonblick förvandlas till en tung vätska (2). Detta fenomen kan också inträffa i annan tinande jord, särskilt i de fall då den tinande jorden består av tjälad och därmed isanrikad siltig jord. Sker upptiningen snabbt kan höga porvattentryck uppstå. Dessa kan ytterligare förstöras av yttre vibrationer och skakningar och porvattentrycken kan då bli så höga att effektivtrycket blir noll och jorden beter sig som en vätska.

1.5 Packning

I områden med siltjordar är det ofta önskvärt att använda och packa den befintliga jorden vid uppbyggnad av fyllningar och bankar. Siltjordars packningsegenskaper är dock mycket känsliga för jordens vattenkvot. Relativt små förändringar vid t.ex. nederbörd kan kraftigt förändra en siltjord från ett material som kan packas till fast lagring till ett material som vid packning uppför sig som en flytande deg. Vid för hög vattenkvot svänger systemet jord/vatten endast i takt med packningsredskapet och man får inte någon packningseffekt. Den vattenanrikade jordens ringa bärighet medför då också svår spårbildning från packningmaskinerna, *Fig. 1.3*.

Packning på ”torra” sidan medför risk för låg packningsgrad och nedsatt fasthet och sättningar vid en senare förhöjning av vattenkvoten, speciellt om det opackade materialet består av hårda klumpar. Packning vintertid kan också medföra att frusen jord kommer in i fyllningen och packningsresultatet försämras då avsevärt. De deformationer som uppkommer vid upptining av en fyllning där frusen jord förekommer kan uppskattas på basis av jordmaterial, vattenkvot och temperatur vid packningen (3).

Siltjordars packningsegenskaper är mycket känsliga för jordens vattenkvot.



Fig. 1.3
Spårbildning från arbetsmaskiner i silt med stort vatteninnehåll.
Foto Björn Hedberg.

Stabiliteten och bärigheten i silt baseras i hög grad på negativa portryck

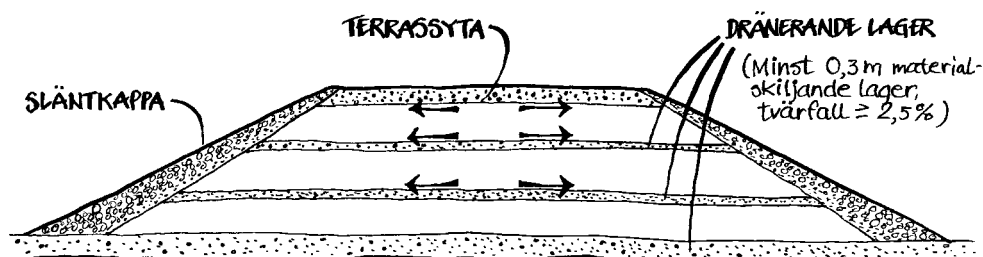
Den packningsgrad som uppnåts när en tjälbenägen siltig jord packats under ofrusna förhållanden förändras om jorden utsätts för upprepad frysning och tining. Det har visat sig att en välpackad silt/siltig morän successivt luckras upp då denna genomgår upprepade fryscyklar. Efter cirka fem fryscyklar har packningsgraden reducerats till ett gränsvärde som är lägre än det som eftersträvades i samband med packningen. På motsvarande sätt kommer en lös jord att packas (konsolideras) till följd av upprepad frysning och tining. Den slutliga packningsgraden blir ungefär densamma som den välpackade jorden får till följd av uppluckring (4).

Packning av siltjord ställer således höga krav på att vattenkvoten är lämplig. Vid för höga vattenkvoter kan packningen behöva utföras i omgångar, där de vid packningen genererade porvattentrycken får avgå och jorden konsoliderar mellan packningsomgångarna. Mellanlagring för avvattning och inväntan av mer tjänlig väderlek kan också bli aktuell. Krav på arbetsmetodik, lagertjocklekar och liggtider i vägbyggnadssammanhang finns angivna i VÄG 94 (5). Inverkan av vattenkvot, erforderligt packningsarbete, begränsningar i packningsbarhet vid för höga respektive för låga vattenkvoter och lämplig arbetsgång kan idag bedömas med hjälp av MCV-metoden (6).

Vid konstruktion av bankar av finkornig jord behöver lager av dränerande material ofta bäddas in för att såväl underlätta dräneringen vid packning som för att eliminera senare tjälproblem, *Fig. 1.4*. Eventuella problem i samband med tjällossningen minskar eftersom de dränerande lagren i konstruktionen minskar dräneringsvägarna. En finkornigare jord mellan dräneringslagren kan då användas utan att höga porvattentryck uppkommer under tjällossningsperioden, se vidare kapitel 3.

Slänterna måste vara så flacka att de inte glider vid vattenmättnad vid ytan och en släntkappa av dränerande och filterande material som utgör skydd mot yterosion måste läggas ut.

Fig. 1.4
Principskiss för utformning av en bank av och på siltjord, se vidare i VÄG 94 (5).



1.6 Stabilitet och bärighet i bankar

Stabiliteten och bärigheten i silt är ofta beroende av det negativa portryck som skapas av de kapillära krafterna i jorden ovanför grundvattenytan. Detta medför att såväl stabiliteten som bärigheten är beroende av vattenbalans och grundvattenytans läge.

I väg- och järnvägsbankar av silt är det därför viktigt att se till att jorden efter packningen inte utsätts för alltför stor vatteninfiltration med åtföljande hållfasthetsnedsättning. På grund av vattenuppsugning varierar skjuvhållfastheten ofta med årstiden i ytliga oskyddade jordlager. En fuktig silt har oftast hög odränerad skjuvhållfasthet och därmed hög bärighet för trafikbelastningar, speciellt om den är packad, men får den tillgång till vatten blir hållfasthet och bärighet starkt nedsatt. Stabiliteten i tjälade siltmassor som tinar blir också nedsatt på grund av att det vatten som anrikas vid tjälningen frigörs vid upptiningen, se t.ex. *Fig. 1.5*. Detta kan också gälla packade bankar med silt som inte haft tillgång till annat fritt vatten än vad som givits av nederbörden.

1.7 Stabilitet i slänter

Hållfastheten i omättad silt, såväl odränerad som dränerad, avtar hastigt om jorden får tillfälle att suga upp vatten. Det är därför väsentligt att bestämma variationer i grundvattenyta och porvattentryck i naturliga slänter samt att förhindra vattenuppsugning och tillförsäkra en god dränering av silt i såväl naturliga som skapade slänter. Stabilitetsberäkningar i silt har tidigare utförts som antingen odränerad analys (främst baserad på vingförsök) eller dränerad analys med användning av de effektiva hållfasthetsparametrarna c' och ϕ' . Detta har numera ersatts av den kombinerade analysen som beaktar den farligaste kombinationen av dräneringsfall i jordmassan (8).

Stabiliteten i silt baseras i hög grad på negativa portryck på grund av kapillärkrafter i såväl den kapillärt vattenmättade som den



Fig. 1.5
Släntskred i samband med tjällossning. Erosionsskyddet påfördes i detta fall på en tjälad och delvis snötäckt slänt, (7).

omättade zonen ovan grundvattenytan. Metoder för att mäta negativa portryck i fält och på laboratorium beskrivs i kapitel 4 respektive 5. Beräkning av stabilitet med hänsyn till negativa portryck redovisas i kapitel 6.

På grund av siltjordarnas skiktning kan grundvattensituationen ofta vara mycket komplicerad med flera separata grundvattenmagasin med varierande portrycksförhållanden åtskilda av tätare skikt av lerig silt, siltig lera eller lera, *Fig. 1.6*. Omfattande observationer kan därför behövas för att skapa en fullständig bild av grundvattensituationen.

Skred i siltjordar är ofta relativt ytliga och stabiliteten påverkas då i hög grad av faktorer som ytvärning, anrikning av fritt vatten vid snösmältning och upptining samt förekomst av vegetation och rotsystem, *Fig. 1.7*. De ytliga

skreden är särskilt vanliga i samband med tjällossning, speciellt i ett skede där inte hela det tjälade partiet av slänten hunnit tina. Allt vatten som bildas genom snösmältning och till följd av att den tjälade jorden tinar, måste då rinna av i och längs släntens ytskikt eftersom infiltration är förhindrad. Detta reducerar stabiliteten i de ytliga skikten.

Siltskikt i leravlagringar kan också innebära stabilitetsproblem, om silten är mycket löst lagrad och därmed innebär ett svaghetsplan under odränerade förhållanden, eller om höga vattentryck råder i skiktet. Höga porvattentryck i siltskikten kan, förutom av geohydrologiska förhållanden, också förorsakas av påslagning, sprängning eller andra kraftiga vibrationer (t ex 9).

Grundvattensituationen kan ofta vara mycket komplicerad.

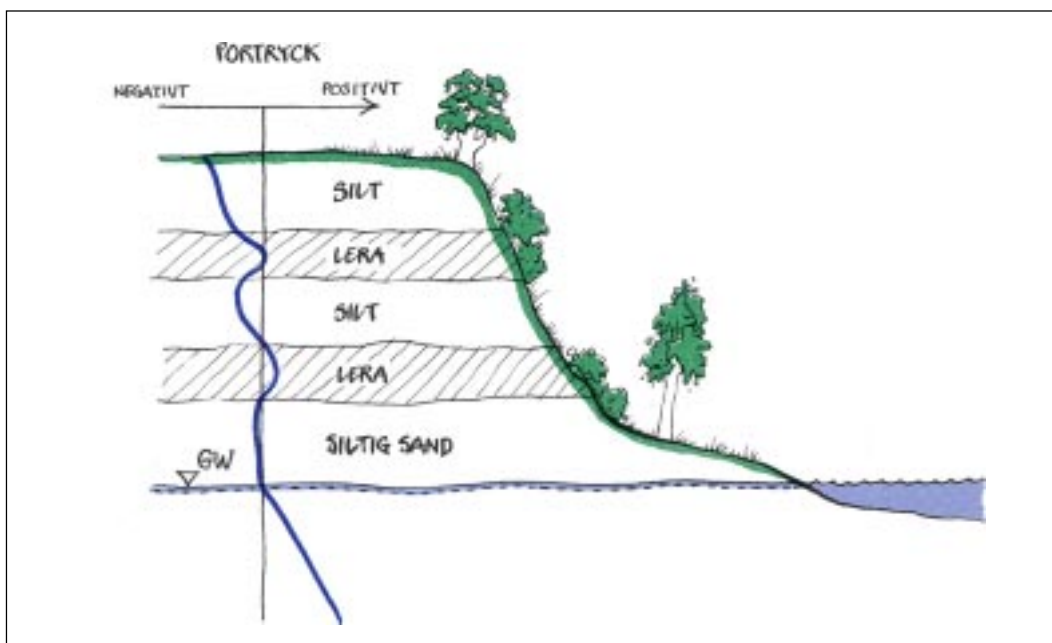


Fig. 1.6
Exempel på en slänt med olika grundvattenmagasin.

a)



b)



c)



Fig. 1.7
Exempel på skred i
siltslänter, Ångerman-
älven.

- a) Större skred i en
nipa på våren,
Foto Lennart Arnborg.
b) Typiskt ytligt skred i
siltslänt.
c) Skred i siltslänt
framför fritidshus.

1.8 Erosion och flytbenägenhet

Mellan- och grovsilt är tillsammans med sand de mest lättero-derade jordmaterialen. Vid vattendrag förstärks stabilitetsproblemen av siltens erosionsbenägenhet, som medför stor risk för erosion vid släntfoten. Nederbörd och ytvattenavrinning respektive grundvattenerosion kan på motsvarande sätt förorsaka erosion i botten av raviner, *Fig. 1.8*. Denna erosion uppstår dessutom ofta samtidigt som hållfastheten i jorden är nedsatt på grund av vattenanrikning och höga grundvattenytor. Detta resulterar i relativt ytliga skred där det utrasade materialet successivt förs bort av det strömmande vattnet. I norra Sverige uppstår dessa problem främst under våren.

Om inte vegetationstäcket är tillräckligt kraftigt utbildat och slänten inte är försedd med annat erosionskydd, finns också stor risk för yterrosion i samband med upptining och snösmältning samt nederbörd. Problem med yterrosion uppstår ofta i nyligen frilagda ytor som skapats vid avverkning, anläggningsarbeten eller inträffade skred, *Fig. 1.9*. Också relativt små avverkningar för t.ex. ledningsgator eller utsikt för fritidshus kan sätta igång svår- bemästrade erosionsförlopp. Effekten av olika

metoder för stabilisering av siltslänter som t.ex. jordspikning kan också nedsättas eller ointetgöras av pågående yterrosion eller erosion på grund av vattenströmning längs spikarna. Stor risk finns också för jordflytning i samband med översvämningar

Yterrosion respektive erosion vid släntfot och ytliga skred, eller båda processerna i kombination, är ofta så starka att ingen bestående vegetation förmår etablera sig när förloppen väl startat. Skapas inget effektivt erosionskydd kan de pågå kontinuerligt år efter år och med tiden äta sig bakåt över stora områden tills de slutligen hindras av att partier med berg eller mer svåreroderad jord nås, *Fig. 1.10*.

En översiktlig kartering har gjorts av den erosion som pågår i anslutning till naturliga vattendrag med tillhörande ravinbildningar samt intilliggande områden, där risken är påtaglig för att de inom överskådlig tid skall involveras i ravinernas vidare utbredning (10, 11), *Fig 1.11*.

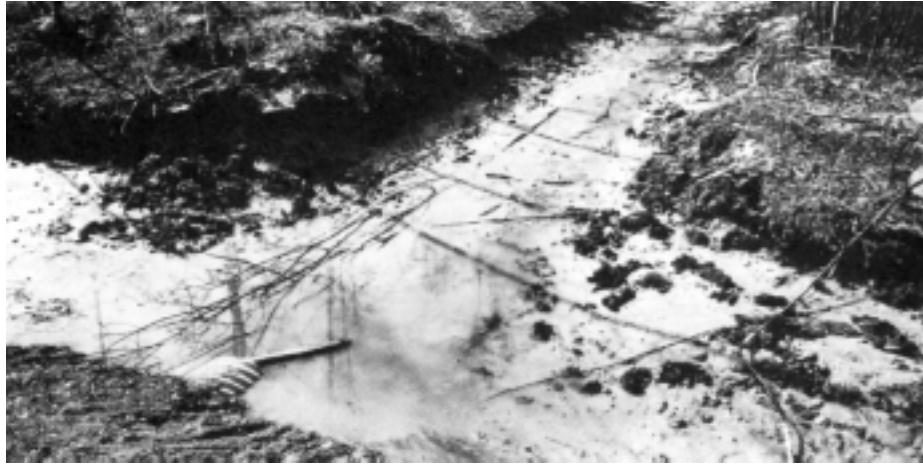
Bankar som är uppbyggda av siltjord är också mycket känsliga för erosion. Genombrott och bortspolning av stora partier av bankarna har inträffat vid ett flertal tillfällen i samband med översvämningar eller igensättning av dräneringstrummor, *Fig 1.12*.

Mellan- och grovsilt är tillsammans med sand de mest lättero-derade jordmaterialen.



Fig. 1.8
25 m djup ravin vid Byskeälven nära Fällfors. Ravinbildningen har startat genom att älven eroderat sig in i nipan vid utbildandet av den meanderslinga som skett under de senaste hundra åren. Ravinen har sedan skapats under 30 till 40 års tid av det grundvatten som strömmar ut vid ravinspetsen (10).

a)



b)



c)



Fig. 1.9

Exempel på yterrosion.

a) Nygrävda diken som fyllts igen genom att slänterna glidit ner.

b) Skärningsslänt där yt-skiktet glidit ner. (8)

c) Nybyggd vägbank av silt där yt-skiktet eroderat i samband med snösmältning och tjällossning. Foto Björn Hedberg.

a)



Fig. 1.10
a) Pågående ravinerosion i åkermark. Försök har gjorts att hejda erosionen genom att fylla ravinen med diverse tillgängligt material men misslyckats.
b) Pågående ravinbildning genom tunnelerosion. (10)

b)



Fig. 1.11
Ravinbildning och riskområden runt Norsälven (10). Svarta linjer betecknar ravinbotten, mörkt skuggade områden är nuvarande ravinslänter, ljust skuggade områden är aktuella riskområden och pilar betecknar inflöden av ytvatten.

Fig. 1.12
Vägbank av silt som brutits igenom och delvis spolats bort på våren på grund av en delvis igensatt och förklent dimensionerad dräneringstrumma
Foto Björn Hedberg.



1.9 Stabilitet och länshållning i schakter

Hållfastheten avtar snabbt om silten får tillfälle att suga upp vatten

Den odränerade skjuvhållfastheten i silt är ofta hög, vilket kan utnyttjas i det korta perspektivet, t.ex. vid schaktning för rörgravar. Man måste dock vara medveten om att hållfastheten snabbt avtar om materialet får tillfälle att suga upp vatten. Beroende på schaktens geometri, grundvattenytans läge, jordens permeabilitet och dräneringsvägarna kan temporära schakter i silt stå öppna en viss tid. Denna tid är dock avsevärt kortare än motsvarande tid för kohe-sionsjord och rör sig för silt ofta om timmar. Detta ställer speciella krav på utförande och arbetarskydd. En förenklad metod att beräkna tiden till brott i siltschakter och riktlinjer för schaktarbeten för rörgravar i silt har utarbetats (12, 13, 14).

Vid schakter som skall hållas öppna under längre tid kan inte den odränerade skjuvhållfastheten utnyttjas utan stabiliteten måste säkras på annat sätt, t.ex. genom flackare slänter eller spontning. På grund av jordens erosionsbenägenhet och risken för bottenuppluckring måste grundvattnet vid schaktning under grundvattenytan ofta sänkas av innan schaktningens arbetet påbörjas och under den tid schakten står öppen (15). Vid schaktning i tätare jord med underliggande sand och siltskikt måste man också ta hänsyn till risken för att vattentrycken i starkt vattenförande lager skall medföra risk för bottenuppträckning av de tätare ovanföriggande lagren. I siltjordar utförs grundvattensänkningen vanligen med wellpoints med vakuüm. Alternativt kan elektroosmos användas men detta är ovanligt. I grövre jordar med siltinnehåll används ofta enklare metoder. I dessa fall måste tas hänsyn till risken för inre erosion med urspolning av finmaterialet samt bottenuppluckring och flytjordsfenomen på grund av stora hydrauliska gradienter. Detta kan åtgärdas med filter och nedsänkta pumpbrunnar. Eventuella åtgärder måste dock sättas in snabbt för att inte jordens egenskaper skall hinna bli kraftigt försämrade.

Vid mindre sättningssänsliga konstruktioner räcker det ofta att se till att eventuell inre erosion på grund av uppträngande vatten snabbt stoppas och att bärigheten återskapas. Vid vägbyggnad i skärningar kan detta göras med hjälp av ett materialskiljande lager, t.ex. en geotextil, och ett grus eller makadamlager som skapar filterverkan och återskapar effektivspänningar i siltjorden, Fig. 1.13.

Grundvattensänkning medför att stabiliteten för schaktslänterna kan baseras på en djupt liggande grundvattenyta och att risken för vattenuppsugning i stort är eliminerad, bortsett från kraftig nederbörd som kan påverka de ytliga jordlagren. En omfattande grundvattensänkning som påverkar närliggande konstruk-

Fig. 1.13
Utläggning av geotextil och makadamlager på vattenmätad silt vid vägbygge i en skärning.
Foto Björn Hedberg.



tioner kan dock som regel inte tillåtas, utan i dessa fall kan också tätspont, slitsmurar, injektering eller andra metoder bli aktuella, tillsammans med lokal grundvattensänkning inom schakten.

Vid bedömning av behov av grundvattensänkning måste man vara medveten om att grundvattensytan i siltjord kan variera kraftigt och hastigt, såväl säsongsvist som vid kraftiga regn respektive vid torka.

Schaktning vintertid i flytbenägen silt ställer särskilda krav på uppmärksamhet. Så länge schaktens djup är mindre än, eller lika med, det aktuella tjäldjupet har man normalt inga problem med stabiliteten. Problemen uppkommer då man schaktar djupare än tjäldjupet. Om inga stabiliserande åtgärder har vidtagits, kan den flytbenägna silten flyta in i schakten. Detta medför att ett överhäng av frusen jord skapas, se Fig. 1.14. Sådana överhäng är mycket farliga för dem som vistas i schakten, eftersom partier av schaktväggarna plötsligt kan brytas av och falla ner. De nedfallande hårda partierna kan vara mycket stora och tunga, varför konsekvenserna kan bli ödesdigra.

1.10 Bärighet och sättningar

Löst lagrad silt är relativt kompressibel. Jorden är dessutom så tät att en påtaglig hydrodynamisk fördröjning av sättningsförloppet kan uppstå. För vanliga statiska lastfall under plattor och bankar är dock permeabiliteten normalt så hög att de genererade portrycken avgår i samma takt som lasten påförs. I lerig silt och i profiler som innehåller skikt och lager av mer finkornig jord bör dock stabilitet och bärighet kontrolleras med användande av odränerad skjuvhållfasthet och/eller portrycksobservationer.

Bärigheten för plattor på siltjord beräknas lämpligen med hjälp av allmänna bärighetsekvationen, vilket närmare beskrivs i kapitel 6.2. Vid statiska lastfall är normalt endast de dränerade hållfasthetsparametrarna relevanta, utom i en del fall med lerig silt och skikt med mer finkornig jord. För hastiga lastväxlingar kan dock vattenmättad silt ofta uppträda odränerat och odränerade parametrar vara aktuella. I vissa fall kan också bärigheten beräknas på basis av pressometerförsök med de metoder som utarbetats för denna försökstyp.

Bärigheten i silt är beroende av den fria grundvattensytans läge och eventuella negativa porvattentryck i jorden. Dessa faktorer kan variera kraftigt och försiktiga antaganden bör göras. Resultaten från pressometerförsök är också starkt beroende av eventuella negativa

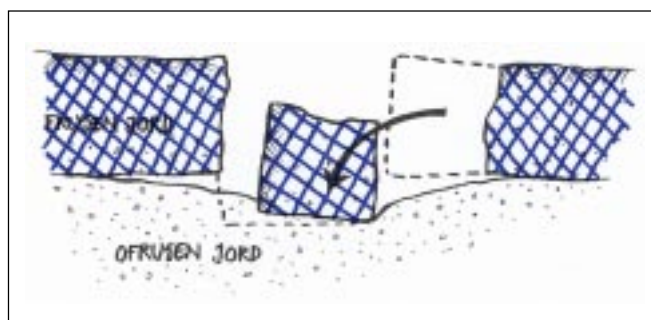


Fig. 1.14
Överhäng av frusen jord, vid schaktning vintertid i flytbenägen silt under det aktuella tjäldjupet.

portryck vid försökstillfället, men någon metod för att korrigera för andra grundvattenförhållanden och reducerade negativa portryck finns inte.

Vid löst lagrad silt blir brottgränstillståndet normalt inte dimensionerande, utan det högsta tillåtna grundtrycket begränsas av ett kriterium för acceptabla sättningar i bruksgränstillståndet.

Sättningar i silt beräknas lämpligen med hjälp av elasticitetsteori och de sättningsmoduler som utvärderas ur dilatometerförsök eller CPT-sondering. Detta beskrivs mer detaljerat i kapitel 7. I fast jord kan också moduler utvärderade från hejarsondering bli aktuella. I lerig silt och lager av finkornigare jord kan kompletterande resultat från ödometerförsök behövas. Också resultat och beräkningsmetoder baserade på pressometerförsök kan vara användbara. Pressometerförsök av god kvalitet är dock svåra att utföra i siltjord under grundvattensytan.

På grund av de relativt stora, och vid heterogen jord varierande sättningarna, används ofta förbelastning med överlast för att ta ut sättningarna i förväg. Som ovan nämnts sker huvuddelen av konsolideringen normalt i samma takt som upplastningen. Detta kan kontrolleras genom portrycksmätning. På så vis kan man säkerställa att full portrycksutjämning skett och att vidare krypförlopp kan avbrytas genom borttagande av överlasten.

Vid plattgrundläggning på silt blir sättningarnas storlek ofta starkt beroende av vilken störning som skapas i schaktbotten vid grundläggningsarbetet. Stor försiktighet måste iaktas, speciellt i vattenmättad silt, så att inte schaktbotten mjukas upp i samband med grävningens arbetet, påverkan av arbetsmaskiner efter avslutat grävande, riklig nederbörd eller uppströmmande grundvatten. Vid kraftig påverkan måste de uppmjukade lagren schaktas bort och ersättas med ett materialskiljande lager samt ett välgraderat material, t.ex. skärv eller stenigt grus, som packas med en icke-vibrerande metod (16). Vintertid måste schaktbotten och gjutna plattor skyddas så att inte tjäle bildas i jorden under grundläggningsnivån.

Bärigheten i silt är beroende av den fria grundvattensytans läge och eventuella negativa porvattentryck i jorden.

1.11 Pålning

Vid pålning i silt uppstår såväl negativa som positiva portrycksförändringar, beroende på jordens lagringstäthet och permeabilitet, grundvattenförhållandena samt vilken del av pålen som betraktas. Vid slagningen kan ett porundertryck uppstå vid spetsen, på grund av dilatans effekter då denna passerar lager av fast lagrad jord. Porundertrycket på nivån avklingar sedan allteftersom pålen drivs vidare och avståndet till spetsen ökar samt, om det inte är utjämnat dessförinnan, efter att påslagningen är avslutad. I lösa och medelfasta lager kan motsvarande porövertryck uppstå. I många fall packar sig dock den lösa jorden runt pålen vid påslagningen och samma effekter som vid fast jord kan då uppstå. En ökande påslagningsfrekvens kan medföra högre risk för bestående porundertryck och s.k. falskt pålstopp under slagningsförloppet. Med falskt pålstopp avses att pålen vid slagningen uppvisar ett större slagningsmotstånd än vad som motsvarar dess statiska bärförmåga. Risken för falskt pålstopp är störst i fast lagrad finsilt-lerig silt (17, 18).

I lös, finkornig silt och lerig silt utbildas höga portryck vid påslagningen. Dessa kan uppskattas med ledning av portrycksutvecklingen vid CPT-sondering (19), medan portrycksutjämningsförloppet är svårare att prognostisera. Utjämnning av porövertryck medför en kraftig ökning av pålarnas mantelfriktion, medan å andra sidan en utjämnning av negativa portryck nedsätter bärförmågan. Detta förhållande gör att utvärdering av bärförmåga hos mantelburna pålar genom stötvågsmätning under eller direkt efter pålningsarbetet kan vara tvivelaktig i såväl silt som sand. Vid stötvågsmätning under senare skeden är det också endast ett första slag som kan analyseras, eftersom upprepade slag återskapar motsvarande portrycksförändringar som vid påslagningen.

Vid stötvågsmätning genereras vissa portrycksändringar också vid ett första slag, vilket dock normalt inte kan beaktas. Likaså skapas portrycksändringar vid statisk provbelastning. Effekten av detta kan minimeras genom att anpassa försöksutförandet, främst genom en långsam pålastning (18).

Innan någon provning av bärförmågan hos mantelburna pålar utförs eller upprepas bör alla portrycksförändringar från påslagningen vara utjämnade. För sand och grövre silt innebär detta att provning inte bör utföras, eller upprepas, förrän 12 -24 timmar efter att föregående slagningsarbete avslutats (20). För tätare jord gäller motsvarande längre tid.

Också efter full portrycksutjämnning sker normalt en tillväxt i bärförmåga med tiden. För silt och sand är denna i medeltal 30 - 40 % efter 4 månader. Några undantag utan ytterligare ökning har dock uppmätts, liksom fall där ökningen under motsvarande tid varit mer än 100 % (21).

1.12 Förstärkning av siltjord

Silt är ofta så kompressibel att det blir aktuellt att förstärka jorden. Detta kan göras genom förbelastning för att ta ut sättningarna i förskott. Permeabiliteten i silt varierar inom fyra till fem tiopotenser, vilket medför stora skillnader i konsolideringsegenskaper. Finsilt kan vara så tät att den har egenskaper som motsvarar en leras och det kan följaktligen bli aktuellt att t. ex. använda vertikaldräner för att påskynda konsolideringsförloppet, speciellt vid stora mäktigheter. Grovsilt är å andra sidan så permeabel att detta aldrig blir aktuellt (utom i extremfall för att eliminera risken för liquefaction). I den mån skikt och lager av grovsilt förekommer tillräckligt frekvent och är tillräckligt tjocka kan de ofta utgöra tillräcklig dränering också i finkornigare jordar (22).

Grövre silt befinner sig kornstorleksmässigt på gränsen för de material som kan djuppackas genom vibrering eller fallviktspackning, *Fig 1.15*. Gränsen för vibropackning går mellan siltig sand och sandig silt (23). Finkornig silt kan djupstabiliseras genom vibroflotation. Silten ersätts då delvis med grövre material och man skapar därigenom grus- eller stenpelare i materialet. En annan metod som kan användas i lös silt är jetinjektering (24).

På senare tid har jordspikning använts för att förstärka branta siltslänter, *Fig 1.16*. I dessa slänter är skredrisken ofta begränsad till relativt ytliga glidytor och jordspikningens syfte är då att hålla ihop ytlagren och tvinga ned potentiella glidytor till större djup med lägre ansträngningsgrad. En förutsättning för ett bestående gott resultat är dock att framtida yterrosion förhindras genom att spikhuvudena gjuts in i ett kontinuerligt rutsystem av t ex betongbalkar, som täcker slänten och håller jorden och ett underliggande filter av geotextil på plats. Betongbalkarna utgör senare ett stöd mot glidning hos den vegetation som utvecklas inom rutorna, vilket påskyndas genom sådd eller plantering av snabbväxande vegetation. Alternativt kläs spikhuvuden och hela den stabiliserade slänten in i ett kontinuerligt 80 till 150 mm tjockt lager av sprutbetong. Eventuellt tillrinnande vatten måste då dräneras bort.

Risken för falskt pålstopp är störst i fast lagrad finsilt-lerig silt.



Fig. 1.15
Fallviktspackning av siltjord, (25). Mönstret på fyllnings överyta visar var fallvikten släppts.

Silt är ofta så kompressibel att det blir aktuellt att förstärka jorden.

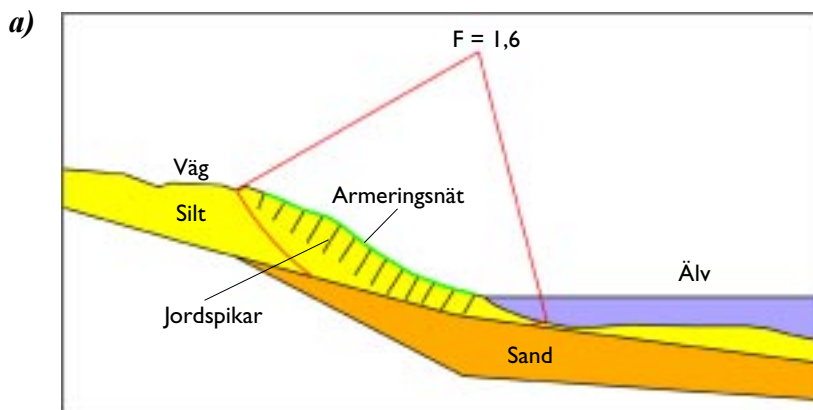


Fig. 1.16
a) Princip för jordspikning av en slänt
b) Exempel på jordspikning med spikskallarna ingjutna i ett stabiliserande rutnät av betongbalkar. I släntens undre del har ny vegetation redan etablerats inom rutsystemet och betongen delvis dolts. Honshu, Japan.

Att läsa vidare:

- (1) **Magnusson, N.H., Lundqvist, G. & Regnéll, G. (1963).** Sveriges geologi. Svenska bokförlaget/Norstedts-Bonniers, Stockholm.
- (2) **Ekström, A & Olofsson, T. (1984).** Water and Frost - Stability Risks for Embankments of Fine-Grained soil. Statens geotekniska institut, Varia 137, Linköping.
- (3) **Viklander, P. (1994).** Frusen jords packnings- och deformationsegenskaper. Licentiatuppsats, Luleå universitet, Luleå.
- (4) **Viklander, P. (1997).** Compaction and thaw deformation of frozen soil. Permeability and structural effects due to freezing and thawing. Avhandling. Luleå universitet, Luleå.
- (5) **Vägverket (1994).** VÄG 94. VV publikation 1994:86, Vägverket, Borlänge.
- (6) **Malmborg, B. S. (1989).** Hur packa fin-kornig jord? Bygg och Teknik, Vol. 80, Nr. 8, s. 26-30.
- (7) **Ahlvik, M., Brorson, I., Iwers, L.G. & Lindgren, J. (1990).** Förbifart Vännäs - geotekniska erfarenheter. Geokonsult Vägverket-VBg och Statens geotekniska institut, Vägledning Nr.3, VV-publ.1990:31.
- (8) **Skredkommissionen (1995).** Anvisningar för släntstabilitetsutredningar. Rapport 3:95, Linköping.
- (9) **Bjurström, G. (1982).** Skredet vid Fröland. Byggforskningsrådet, T26:1982.
- (10) **Bergqvist, E. (1986).** Svenska nip- och ravinlandskap - Processer och former, översikter och förslag till naturreservat. Uppsala universitet, Naturgeografiska institutionen, UNGI Rapport Nr 63.
- (11) **Bergqvist, E. (1990).** Nip- och ravinlandskap i södra och mellersta Sverige- Översikter och förslag till naturreservat. Uppsala universitet, Naturgeografiska institutionen, UNGI Rapport Nr 77.
- (12) **Börgesson, L. (1984).** Släntstabilitet vid schaktning av siltjordar; inverkan av den tid schakten står öppen. Högskolan i Luleå, Teknisk Rapport 1984:85T.
- (13) **Börgesson, L., Carlsson, E., Carlsson, S., Nilsson, R. & Pusch, R. (1984).** Underlag för utarbetande av riktlinjer angående släntlutning vid schaktning utan stödkonstruktion. Högskolan i Luleå, Teknisk Rapport 1984:86T.
- (14) **Arbetskyddsstyrelsen (1987).** Schaktning i jord. Arbetskyddsstyrelsens böcker H13.
- (15) **SBEF, Vägforskningsgruppen (1985).** Länshållning vid schaktningsarbeten. Statens geotekniska institut, Linköping.
- (16) **Magnusson, O. (1984).** Grundläggning med platta. Hanboken Bygg, Geoteknik, Kapital G12, Liber Förlag, Stockholm.
- (17) **Barmen, G., Eken, E. & Persson, B. (1982).** Dynamisk porvattentrycksutveckling under pålning i siltig finsand. Lunds Tekniska Högskola, Geoteknologi, Geoteknik, Rapport TVGT - 5009.
- (18) **Möller, B. (1991).** Falskt pålstopp - en jämförelse mellan statisk och dynamisk bärförmåga hos pålar i siltig jord. Statens geotekniska institut, Varia 342, Linköping.
- (19) **Robertsson, P.K., Woeller, D.J. & Gillespie, D. (1990).** Evaluation of Excess Pore Pressures and Drainage conditions around Driver Piles using the Cone Penetration Test with Pore Pressure Measurements. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 27, No. 2.
- (20) **Holm, G. & Weiner, L. (1994).** Stötvågs-mätning vid påslagning. Metodblad. Byggforskningsrådet, T6:1994.
- (21) **Åstedt, B., Weiner, L. & Holm, G. (1992).** Increase in Bearing Capacity with Time for Friction Piles in Silt and Sand. Artikler, foredrag, generalrapporter og andre bidrag, Nordiske geoteknikermøde, NGM-92, Aalborg, Vol. 2. Sammandrag av "Friktionspålar- bärförmågans tillväxt med tiden". Pålkommis-sionen, Rapport 91.
- (22) **Moritz, L. (1997).** Sättningsuppföljning av Väg 205 vid Riksväg 50 i Askersund. Statens geotekniska institut, Varia Nr. 465, Linköping.
- (23) **Jendeby, L. (1993).** Jordförstärkning - djuppäckning. Byggforskningsrådet T21:1993, Stockholm.
- (24) **Alberts, C., Assarsson, K.G., Broms, B., Eriksson, U., Hansbo, S., Hartlén, J., Holm, G., Knutsson, S. & Pramborg B.O. (1984).** Jordförstärkning. Handboken Bygg, Geoteknik, Kapitel G 16, Liber Förlag, Stockholm.
- (25) **Hansbo, S. (1979).** Packning med fallvikt. FoU Bygg, Nr 1.

2. Grundvattenförhållanden och utvärdering av portryck

Grundvattenförhållandena i siltjord :

- varierar säsongsvist med klimat och topografiska förhållanden.
- medför ofta stora variationer i hållfasthet och bärighet samt stabilitets- och erosionsförhållanden i slänter.

Arbetsgång vid utvärdering av effektiva negativa portryck:

- För överslagsberäkningar kan negativa portryck i den intermediära zonen uppskattas med ledning av jordens kornfördelningskurva.
- Dimensionerande portryckssituation bedöms med ledning av utförda mätningar samt kunskapen om hur grundvattenytan fluktuerar och hur portrycken i de olika grundvattenzonerna normalt varierar.

2.1 Bildning och förekomst av grundvatten

Grundvatten förekommer i all terräng på ett visst djup under markytan. Djupet till grundvattenytan varierar beroende på klimat och geohydrologiska förhållanden i området. Grundvattenbildningen består i huvudsak av infiltration av vatten från nederbörd,

Fig. 2.1a. Vegetationen och det översta jordlagrets beskaffenhet spelar en avgörande roll för grundvattenbildningen, eftersom dessa faktorer styr vilken andel av nederbörden som infiltreras och vilken andel som rinner bort till närliggande vattendrag i form av ytavrinning. Klimat, och framförallt temperatur, är viktiga faktorer eftersom de kontrollerar i vilken mängd och form nederbörden kommer, om markytan är frusen eller inte samt vilken avdunstning som sker.

Grundvattenbildning kan också ske genom infiltration från vattendrag vid högvattenstånd, Fig. 2.1b. Detta är en väsentlig del av grundvattenbildningen i torra klimat och förekommer också i Sverige vid tjällossning och snösmältning, då vattnet inte kan infiltreras på grund av den frusna marken. Vattnet transporteras då till närliggande vattendrag som får en högre nivå än grundvattenytan i omgivande jord, vilket medför att grundvattenmagasinen fylls på längs vattendragen.

Med avseende på vattenförekomst indelas jordprofilen i olika zoner. Dessa kan i profiler med grövre jord som sand och grus förenklas till två huvudzoner: mättad och omättad zon, dvs under respektive över grundvattenytan. Denna förenklade zonindelning kan inte användas i siltjord där flera grundvattenzoner kan urskiljas, Fig. 2.2.

I siltjord kan flera grundvattenzoner urskiljas.

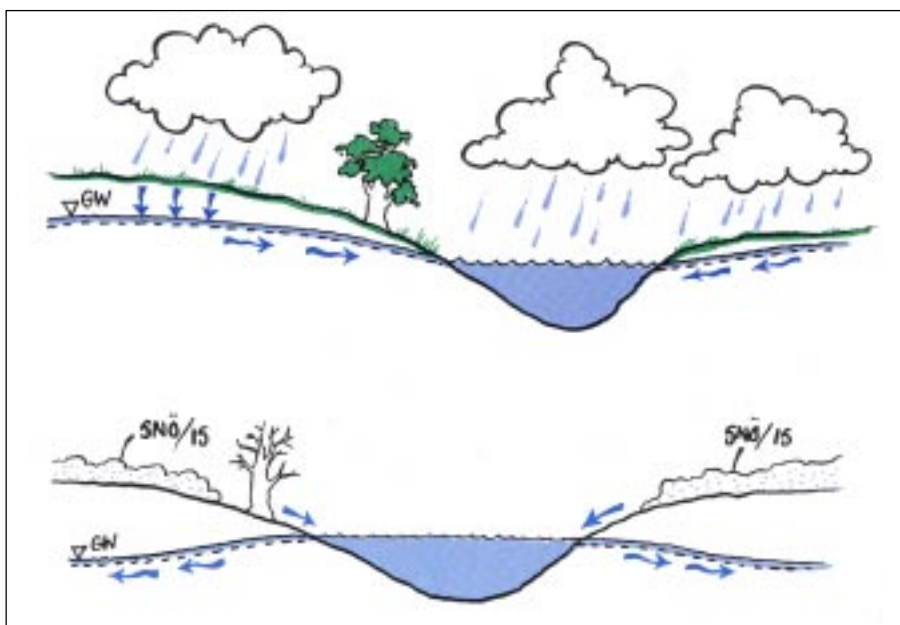
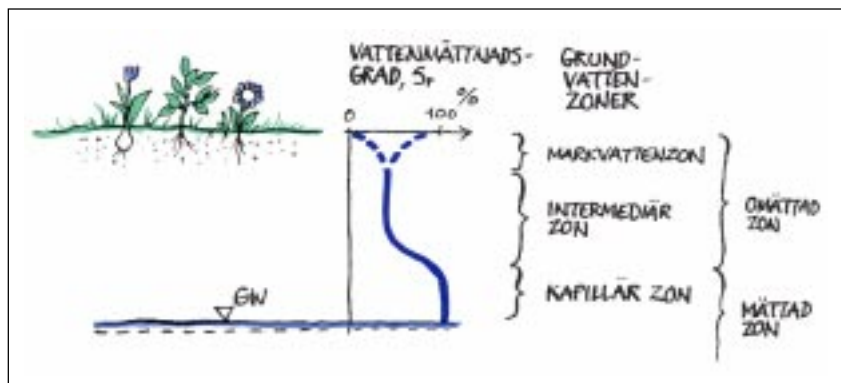


Fig. 2.1. Grundvattenbildning: (a) från infiltration, (b) från vattendrag.

Fig. 2.2.
Zonindelning i en jordprofil med avseende på grundvattenförekomst.



Grundvattensituationen ovanför grundvattenytan har sällan ett stationärt tillstånd, utan påverkas av yttre faktorer som nederbörd, snösmältning och dränering. Vattenmängden i *markvattenzonen* beror främst på infiltration från nederbörd respektive avdunstning och kan periodvis motsvara vattenmättade förhållanden. I den *intermediära zonen* transporteras det infiltrationsvatten som passerat markvattenzonen ner till grundvattnet till följd av gravitationskraften. Den zon som finns direkt ovanför grundvattenytan påverkas av kapillära krafter som suger upp vatten från grundvattenytan och fyller jordens porer, och kallas därför för den *kapillära zonen*.

Den nedre delen av den kapillära zonen är i det närmaste helt vattenmättad. Den kapillära zonen tjocklek, också kallad kapillär stighöjd, beror i första hand på jordens kornstorleksfördelning och lagringstäthet. I siltjord kan den kapillära zonen sträcka sig många meter över grundvattenytan.

Vattenmättnadsgraden, S_r , är ett mått på hur stor andel av jordens porvolym som är fylld med vatten och används ofta för att beskriva grundvattensituationen i den omättade zonen. Den varierar från 0 % för torr till 100 % för vattenmättad jord.

2.2 Portrycksfördelning

Portrycken i en jordprofil relateras till nivå eller djup under markytan och mäts relativt atmosfärstrycket. Grundvattenytan är den nivå i marken där portrycket är noll, dvs är lika med atmosfärstrycket. Som regel är portrycket *positivt* (större än atmosfärstrycket) under grundvattenytan och *negativt* eller noll över grundvattenytan, Fig. 2.3. Vid dimensionering och utförande av geokonstruktioner i siltjord samt tolkning av försöksresultat är det väsentligt att ta hänsyn till de negativa portrycken.

Under relativt långa torrperioder kan vattnet i markvattenzonen avdunsta och portrycken minska. På motsvarande sätt ökar portrycken i markvattenzonen under perioder med kraftig nederbörd. I ytterlighetsfall kan markvattenzonen bli vattenmättad och medföra svagt positiva värden för portrycken.

Vid hydrostatisk fördelning är portrycket på alla nivåer under grundvattenytan samma som det tryck som orsakas av vattnets egen tyngd räknat från grundvattenytan. Detta är normalfallet för permeabel jord.

I silt och annan finkornig och skiktad jord uppstår ofta avvikelser från hydrostatisk portrycksfördelning, t ex när bottenlager eller

I siltjord kan den kapillära zonen sträcka sig många meter över grundvattenytan.

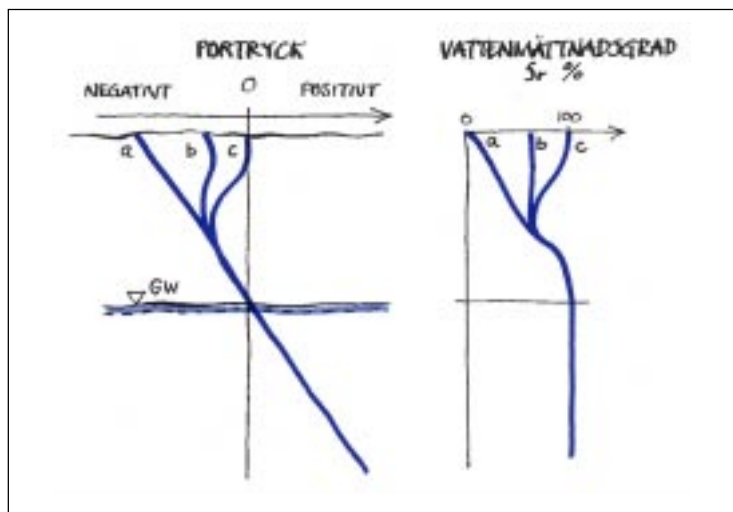


Fig. 2.3.
Schematiska jortrycksprofiler.
(a) under torrperiod.
(b) normalt tillstånd.
(c) under period med kraftig nederbörd.

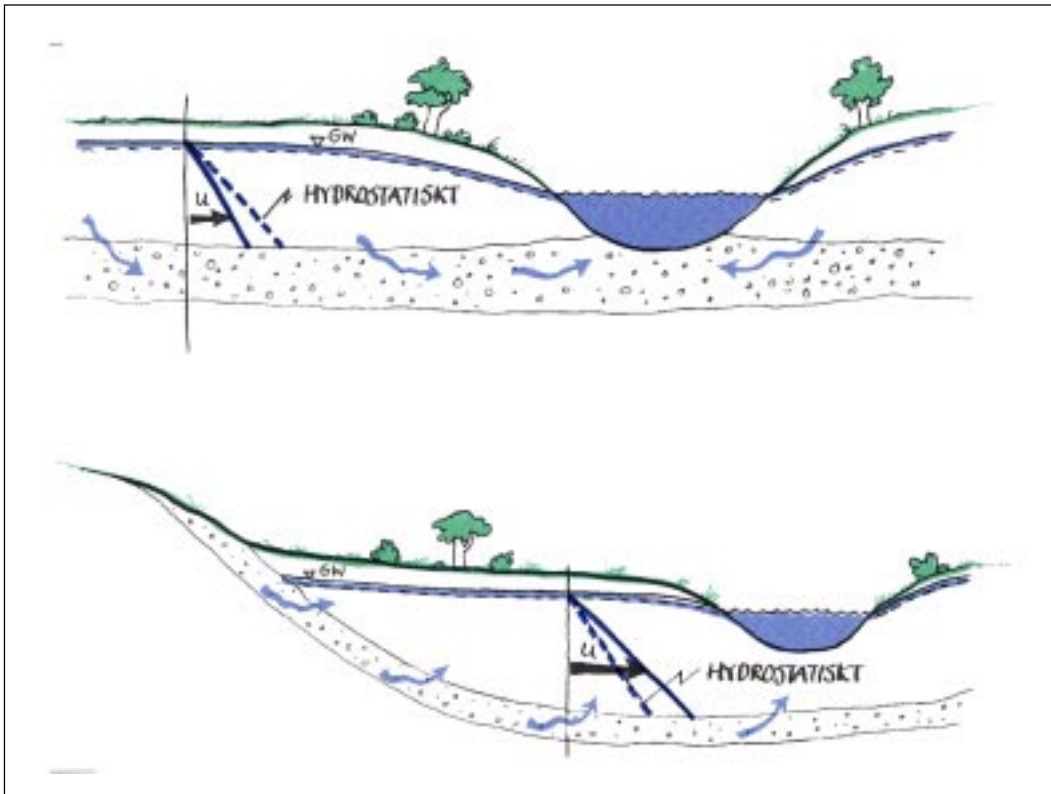


Fig. 2.4.
Portrycksprofiler i fin-
kornig jord som avviker
från hydrostatiskt till-
stånd.
a) inverkan av ett dräne-
rande lager.
b) inverkan av ett vat-
tentillförande lager.

inbäddade lager med hög permeabilitet inverkar på trycksituationen i jordprofilen, *Fig. 2.4.*

Portryckssituationen kan också påverkas av tätare jordlager som hindrar infiltrationsvattnet att rinna ner till den nedre delen av profilen. I dessa fall bildas ofta flera grundvattenmagasin (öppna eller slutna) med olika grundvattenytor. Några exempel på detta visas i *Figur 2.5.*

I plan eller endast svagt kuperad terräng ligger grundvattenytan normalt några meter under markytan. I kuperad terräng med siltjord, speciellt i nip- och ravinlandskap där de naturliga slänterna kan vara upp till 30-40 m höga, ligger grundvattenytan i de högt liggande markpartierna oftast djupt under markytan, *Fig. 2.6.* I dessa landskap är det ofta nivåerna i vattendragen som styr läget för grundvatten-

I silt uppstår ofta avvikelser från hydrostatisk portrycksfördelning.

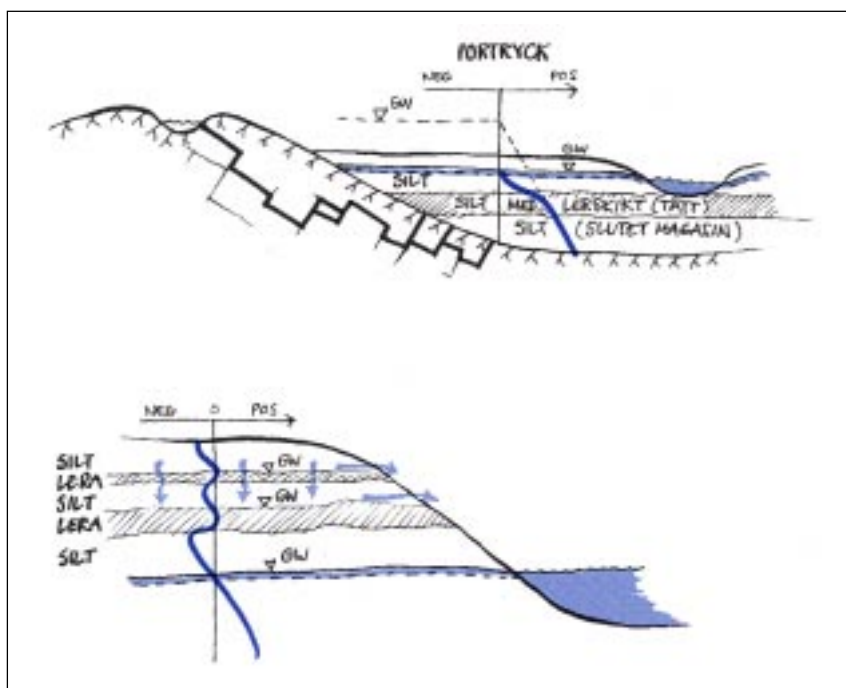
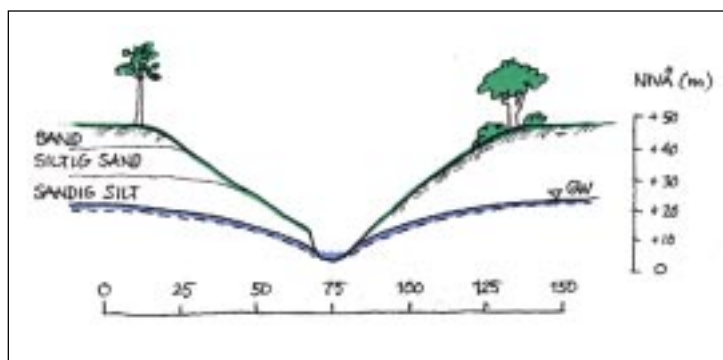


Fig. 2.5.
Portrycksprofiler
med olika grund-
vattenmagasin och
grundvattenytor.

Fig. 2.6
Exempel på
grundvattennivå i
siltslänt

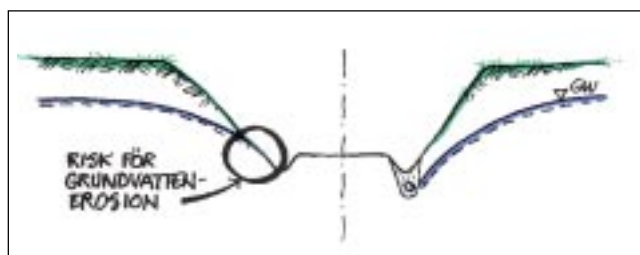


ytan, medan infiltrationsvattnet från nederbörd kontrollerar grundvattensituationen i markvattenzonen och den intermediära zonen.

Vid skärningar för t ex vägar och järnvägar är slänthöjderna i siltjordar oftast måttliga (3-6 m) och den normala grundvattensituationen kontrolleras nästan helt av dräneringsnivån inom skärningen (dikesnivån), Fig. 2.7.

I dessa fall kan dock vattentrycken i slänten snabbt förändras vid kraftigt nederbörd och i kombination med erosion försaka att ytskiktet ”flyter in” i skärningen. Dessa slänter måste därför ofta skyddas både mot yterrosion och mot höga inre vattentryck.

Fig. 2.7
Schematisk
grundvattensitu-
ation i en silt-
skärning.



2.3 Portrycksvariationer

Grundvattensituationen och portrycksprofilens säsongsvisa variationer skiljer stort mellan olika delar av landet. I de norra och mellersta delarna av landet förekommer i stort sett ingen grundvattenbildning under vintermånaderna då all nederbörd stannar på markytan i form av snö och is. Vid vårens snösmältning infiltreras däremot en stor del av smältvattnet, vilket medför en ökning av grundvattennivå och portryck. Dessutom sker ytavrinning till vattendrag i stor skala vilket orsakar vårflooder i många områden.

Påverkan av nederbörd i form av regn beror framförallt på dess mängd och varaktighet. Vid korta nederbördsperioder stannar normalt allt infiltrationsvattnet i rotzonen (markvattenzonen) utan att medföra några konsekvenser för de nedersta zonerna.

Vid stor och långvarig nederbörd på *plana områden* med siltjord kan markvattenzonen mättas och överskottet av infiltrationsvattnet

transporteras då via den intermediära zonen till grundvattenytan. I detta fall påverkas hela grundvattenprofilen och även grundvattenytans nivå kan ändras, Fig. 2.8 a. På grund av den låga permeabiliteten är detta en långsam process. I *lutande terräng* med siltslänter däremot, medför den kraftigt lutande markvattenzonen att

överskottsvattnet avrinner på markytan och att infiltrationen till den intermediära zonen blir begränsad, Fig. 2.8 b.

Vid vårens snösmältning kan situationen liknas vid en kraftigt nederbörd och vattentransporten beskrivas på samma sätt som ovan, dvs i huvudsak vertikal vid plan mark och längs markvattenzonen i slänter.

Snösmältningen orsakar en höjning av vattendragens nivå vid foten av naturliga slänter och av vattennivån i skärningsdiken. Detta påverkar främst grundvattenytans läge samt den kapillära zonen i anslutning till släntfoten. Grundvattenytan vid vattendrag kan fluktuera några meter, vilket i avtagande grad påverkar grundvattensituationen i anslutning till vattendraget, Fig. 2.9.

I sådana områden med siltjordar, där grundvattenytan ligger endast några meter under markytan, sträcker sig den kapillära zonen i jorden ända upp till torrskorpans underkant. I dessa fall är nästan hela profilen vattenmättad och nederbörd

kan endast påverka grundvatteninnehållet i torrskorpan. Å andra sidan behövs endast måttliga mängder infiltrerat vatten för att grundvattenytan skall stiga till torrskorpans underkant eller ännu högre, vilket drastiskt påverkar markytans bärighet.

Om siltens mäktighet ovanför grundvattenytan är större än den undre kapillära stighöjden uppstår en intermediär zon. I detta fall kommer infiltrationsvattnet från nederbörd att först påverka den översta markvattenzonen tills denna är vattenmättad. Om nederbörden slutar efter en relativ kort tid blir inte hela markvattenzonen vattenmättad och infiltrationsvattnet kommer då med tiden att röra sig nedåt och försaka en ”bula” i profilerna för portryck och vattenmättnadsgrad tills det når den vattenmättade zonen, Fig. 2.10 a. Grundvattenytans läge kommer inte att påverkas i någon högre grad av detta vattentillskott.

Om nederbörden varar en längre period och fortsätter efter att hela markvattenzonen har vattenmättats, kan vattnet infiltreras direkt ner

till den intermediära zonen och börja vattenmätta även denna, *Fig. 2.10 b*. Beroende på nederbördens varaktighet och hur mäktig den intermediära zonen är, kan i vissa fall hela portrycksprofilen påverkas och grundvattenytan efterhand stiga.

2.4 Utvärdering av effektiva negativa portryck

2.4.1 Vattenbindningskurva

När vattenmättnadsgraden ändras i jorden över grundvattenytan ändras också det negativa portrycket. Sambandet mellan vattenmättnadsgrad och negativt portryck beskrivs av jordens vattenbindningskurva, se *Fig. 2.11*.

Vattenbindningskurvan ritas i ett diagram med negativt portryck (eller kapillär stighöjd) på ordnatan och vattenmättnadsgrad (eller volymetrisk vattenkvot) på abscissan. Den kapillära stighöjden kan också uttryckas i pF -enheter där $pF = \log_{10} h_c$ och h_c är den kapillära stighöjden uttryckt i centimeter vattenpelare. Detta uttryck används främst inom lantbruksvetenskapen.

Vattenbindningskurvans form beror på porstorleksfördelningen i jorden och därmed indirekt på kornstorleksfördelningen. Kurvan har en mjukare form för en månggraderad jord

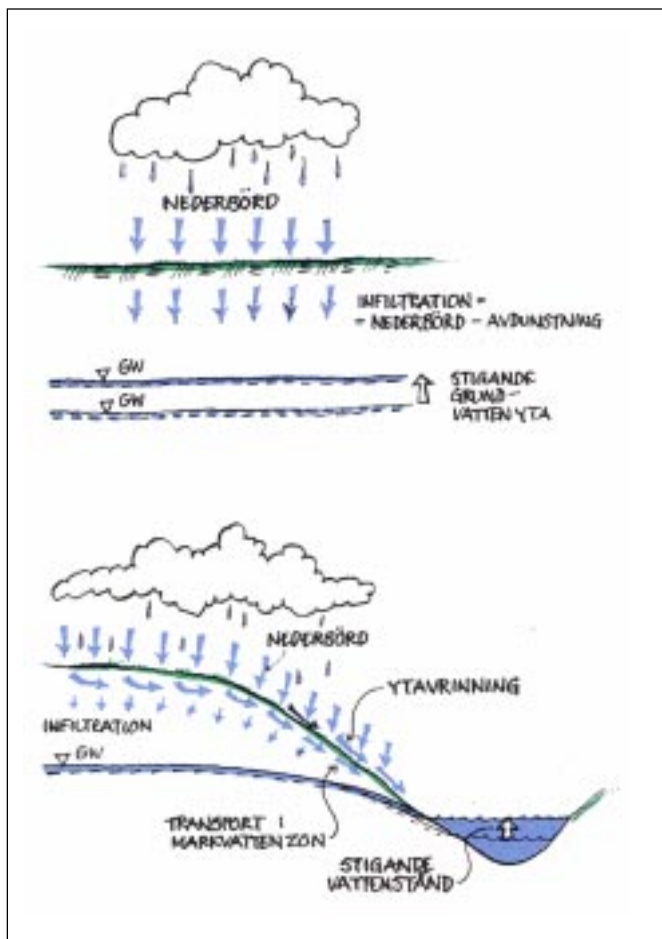


Fig. 2.8
Vattentransport vid kraftigt nederbörd eller vid snösmältning
(a) vid plan markyta
(b) vid lutande markyta

än för en ensgraderad. Vattenbindningskurvan för en jord är inte helt konstant, eftersom något olika kurvor erhålls vid sjunkning (dränering) och stigning (återfuktning) med en viss hystereseffekt mellan de två förloppen.

I den kapillära zonen är porerna nästan helt vattenmättade. Det negativa portryck som medför att luft börjar tränga in i de grövsta porerna kallas för luftgenomsläpplighetstalet

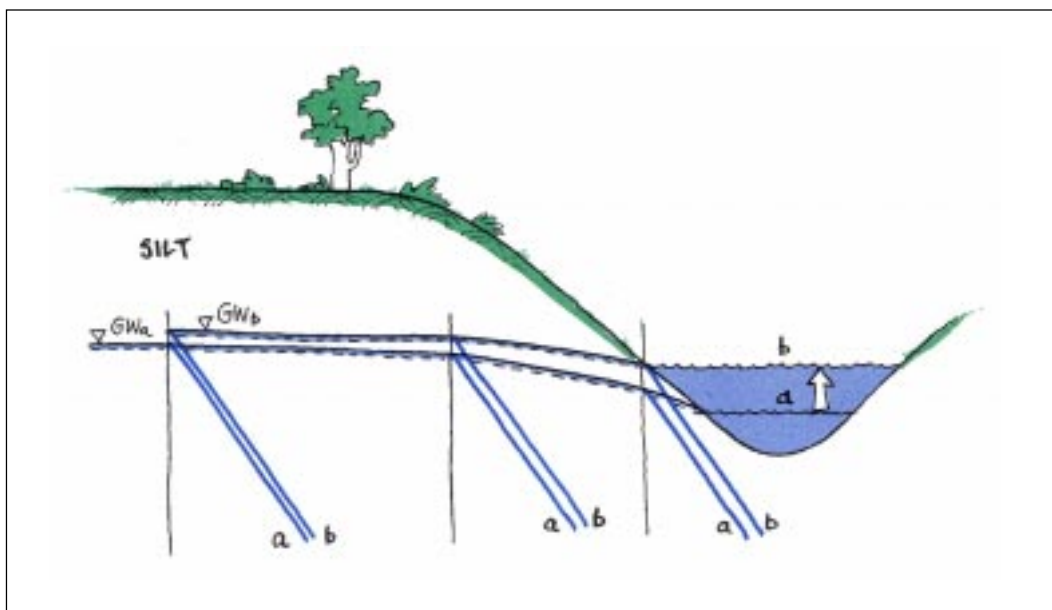


Fig. 2.9
Fluktuation av grundvattenytan orsakad av högvattenstånd i vattendrag

Fig. 2.10
 Successiv förändring av portrycks- och vattenmättnadssituationen vid infiltration av regnvatten i silt.

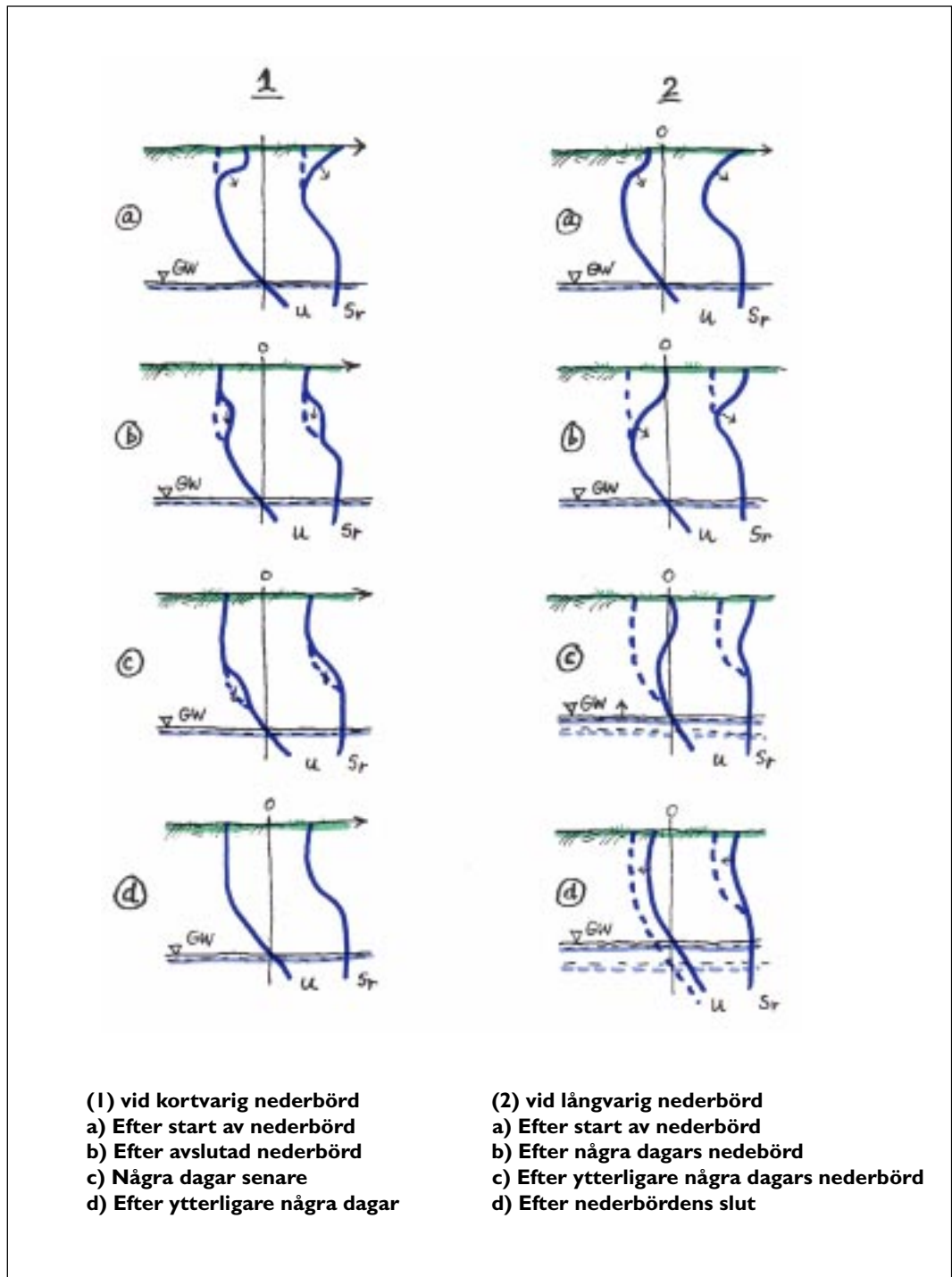
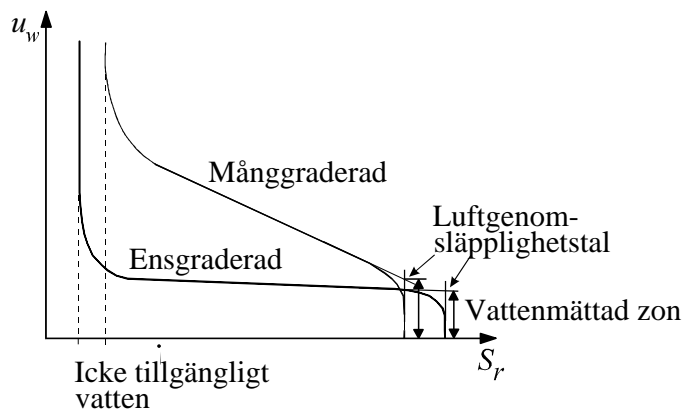


Fig. 2.11
 Schematiska vattenbindningskurvor (I)



(eller den undre kapillära stighöjden). Detta tryck beror på porernas storlek. Ju finkornigare jord, desto högre luftgenomsläpplighetstal och desto mäktigare kapillära zon. Luftgenomsläpplighetstalet och den mättade delen av den kapillära zonen är väl definierade på vattenbindningskurvan.

2.4.2 "Effektivt" negativt portryck

Definition

Skjuvhållfastheten i omättad silt kan uppskattas som

$$\tau_f = c' + (\sigma - S_r u_w) \tan \phi' \quad (2)$$

där τ_f = skjuvhållfasthet

c' = effektivt kohesionsintercept

σ = totaltryck vinkelrätt mot skjuvytan

S_r = vattenmättnadsgrad

u_w = porvattentryck

ϕ' = friktionsvinkel

Det effektiva negativa portrycket, u_{eff} , definieras som portrycket multiplicerat med vattenmättnadsgraden, $u_{eff} = S_r u_w$. Skjuvhållfastheten kan således också skrivas

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_{eff}) \tan \phi'$$

Vid beräkning av hållfasthetsproblem som stabilitet och bärighet behandlas inverkan av negativa portryck ofta som en skenbar (eller falsk) kohesion, c_a , som verkar i tillskott till det effektiva kohesionsinterceptet. Den skenbara kohesionen blir då $c_a = -u_{eff} \tan \phi'$ och hållfastheten

$$\tau_f = c' + c_a + \sigma \tan \phi'$$

I Fig. 2.12 visas ett exempel på en vattenbindningskurva för en silt. Om man multiplicerar det negativa porvattentrycket med tillhörande vattenmättnadsgrad fås en kurva för det effektiva negativa portrycket som också finns inritad i figuren. Som framgår av denna får det effektiva negativa portrycket ett relativt konstant värde inom ett stort intervall för vattenmättnadsgraden. Detta konstanta tryck är ungefär lika med jordens luftgenomsläpplighetstal. Detta är som tidigare nämnts det största negativa portryck för vilket nästan full vattenmättnadsgrad kan bibehållas och är också lika med den undre kapillära stighöjden.

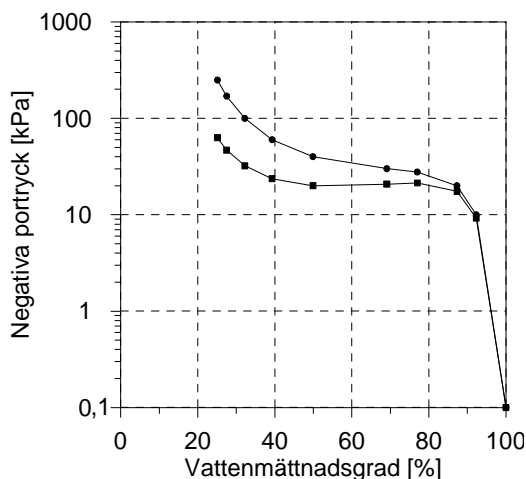


Fig. 2.12
Exempel på vattenbindningskurva och effektivt negativt portryck för en silt.

Uppskattning av effektivt negativt portryck ur jordens kornfördelningskurva

För i stort sett lerfri silt finns ett samband mellan d_{50} -värdet på jordens kornfördelningskurva och jordens effektiva negativa portryck i omättat tillstånd, (3), Fig. 2.13.

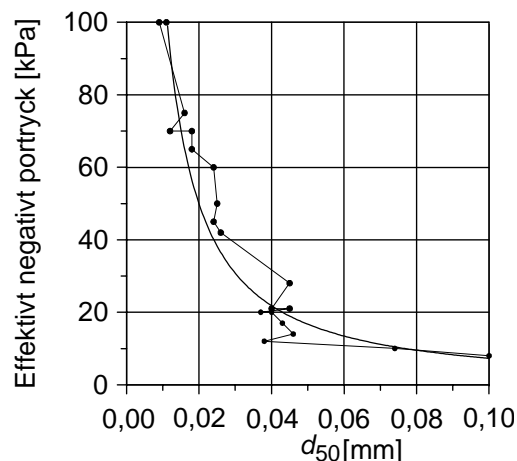


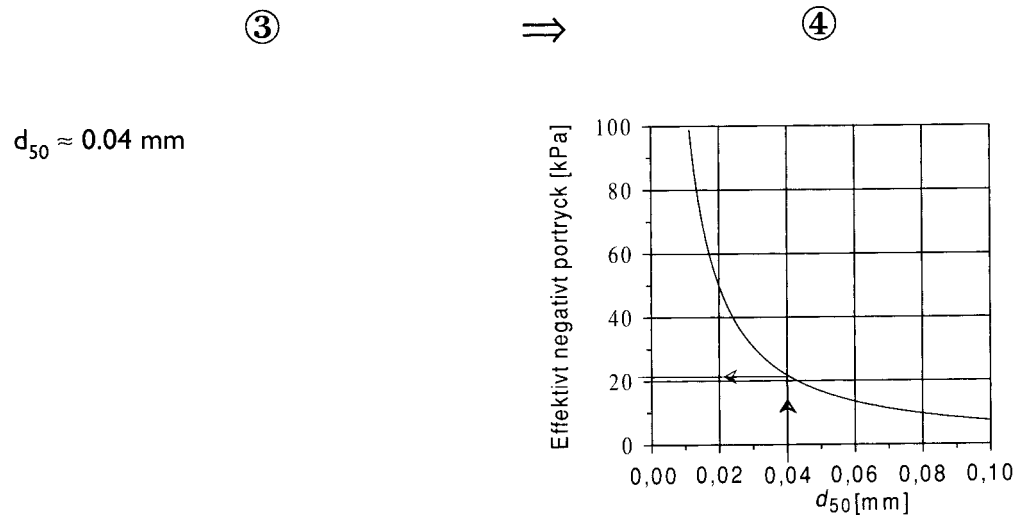
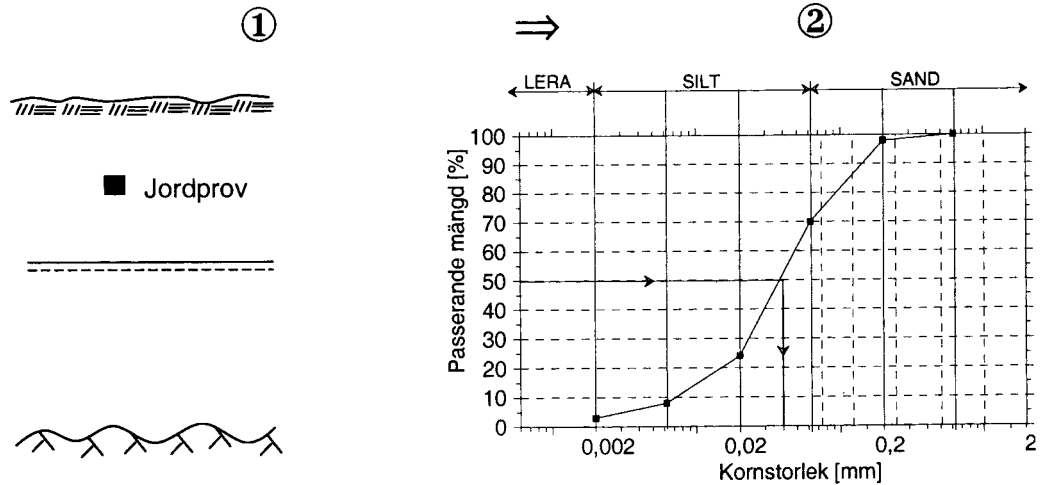
Fig. 2.13
Samband mellan d_{50} -värde och effektivt negativt portryck.

Då jordens lerhalt är större än 5 % bör hela kornfördelningskurvan användas för att uppskatta det effektiva negativa portrycket.

Arbetsgången vid utvärdering av det effektiva negativa portrycket i denna typ av jord visas i Fig. 2.14.

Då jordens lerhalt är större än 5 % bör hela kornfördelningskurvan användas för att uppskatta det effektiva negativa portrycket. Det finns en sammanställning av cirka 400 vattenbindningskurvor med tillhörande kornfördelningskurvor för olika svenska jordar (4). Då kornstorleksfördelningen för den aktuella jorden är känd, kan man gå in i denna sammanställning och leta upp en referensjord med likartad sammansättning. För denna referensjord finns en vattenbindningskurva som relativt väl motsvarar kurvan för den aktuella jorden. I Fig. 2.15 visas arbetsgången vid denna utvärdering

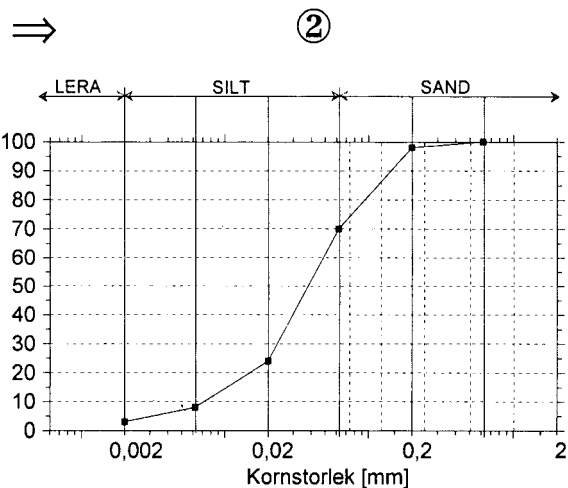
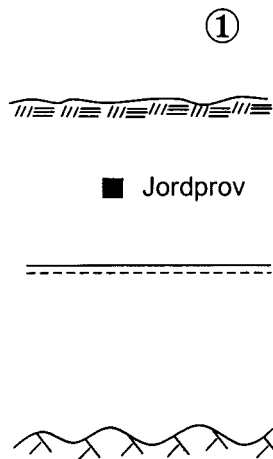
Fig. 2.14
Arbetsgång vid
utvärdering av
effektivt negativt
portryck i lerfri
silt ur d_{50} -värdet.



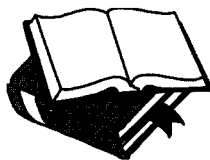
⑤

Det effektiva negativa portrycket är: $u_{\text{eff}} \approx 21 \text{ kPa}$

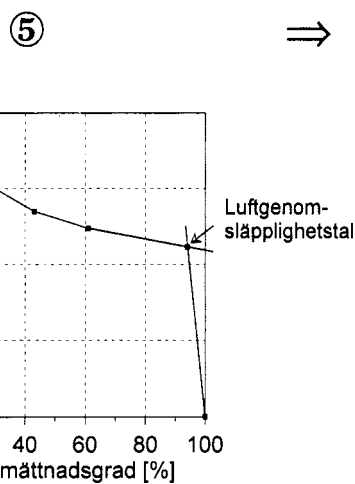
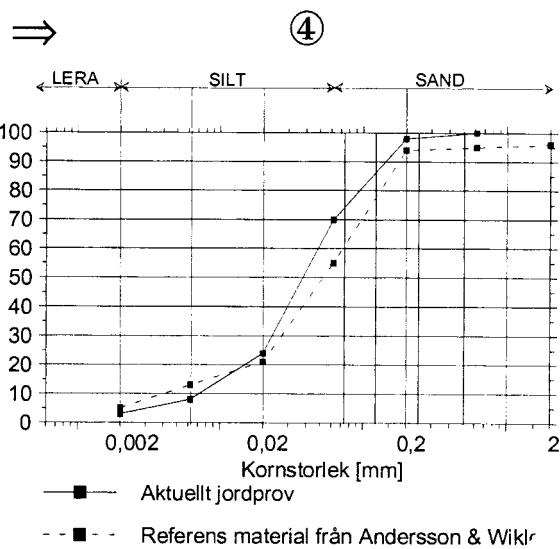
1. Tag ett representativt jordprov från den aktuella nivån
2. Bestäm kornfördelningskurvan
3. Utvärdera d_{50}
4. Gå in med d_{50} -värdet på kurvan för sambandet mellan d_{50} och effektivt negativt portryck
5. Utvärdera det effektiva negativa portrycket



③
Andersson & Wiklert



En databas med 385 vattenbindningskurvor med tillhörande kornfördelningskurvor



⑥
Effektivt negativt portryck bestäms som:

$$u_{eff} \approx u_w \cdot S_r \approx 20 \times 0,95 = 19 \text{ kPa}$$

1. Tag ett representativt jordprov från den aktuella nivån
2. Bestäm kornfördelningskurvan
3. Gå in i Andersson och Wiklerts sammanställning
4. Leta upp en väl matchande kornfördelningskurva för en referensjord
5. Utvärdera det effektiva negativa portrycket ur referensjordens vattenbindningskurva

Fig. 2.15
Arbetsgång vid utvärdering av effektivt negativt portryck med hjälp av referensjord.

■ **Val av metod för utvärdering av effektiva negativa portryck**

1. I de fall där såväl det negativa portrycket har uppmätts i fält eller laboratorium som vattenmättnadsgraden har bestämts används dessa värden.
2. Om det negativa portrycket har uppmätts i fält, men ingen bestämning av vattenmättnadsgraden har kunnat göras, antingen på grund av att prover saknas eller att kvaliteten på de upptagna proven är för dålig, kan empiriska samband för det uppmätta negativa portryckets inverkan utnyttjas. Man kan antingen använda formeln

$$\tau_f = c' + (\sigma - 0,5u_w) \tan \phi' \quad (5)$$

vilken normalt ger värden på säkra sidan, eller hellre det diagram för utvärdering av skenbar kohesion som framgår av Fig. 2.16.

3. Om ingen mätning av av det negativa portrycket har gjorts, kan det effektiva negativa trycket uppskattas ur jordens kornfördelningskurva. För praktiskt taget lerfri jord kan det enkla sambandet med jordens d_{50} -värde användas. I lerigare jord används referenskurvor (4).

2.5 Bedömning av relevanta portryck vid dimensionering

Vid analys av stabilitet eller bärlighet i silt, med hänsyn tagen till negativa portryck, måste man bedöma hur stor del av de mätta eller uppskattade negativa portrycken man kan tillgodoräkna sig. Följande rekommendationer gäller för denna bedömning.

I **markvattenzonen** i den övre delen av jordprofilen påverkas de negativa porvattentryckerna av avdunstning och nederbörd. Nederbörd och snösmältning medför att de negativa trycken i denna zon periodvis minskar eller försvinner. Markvattenzonen sträcker sig normalt cirka 1–3 meter under markytan. Ett antagande på säkra sidan vid beräkningar är att sätta portrycken i denna zon till noll.

I den **kapillära zonen** påverkas de negativa trycken av fluktuationerna i grundvattennivån och de negativa portrycken i denna zon kan antas vara omvänt hydrostatiska. I den kapillära zonen kan man därför i beräkningarna anta porvattentrycken med ledning av den högsta förväntade grundvattenytan.

I den **intermediära zonen** är portryckssituationen mer komplex. Portrycken varierar beroende på kornstorleksfördelning, vattenmättnadsgrad och ytavrinningen. Mätningar har visat att vid branta slänter är påverkan av nederbörd och fluktuationer i grundvattennivån begränsad, utom i zonens nedersta del som kan övergå till att bli en del av den kapillära zonen vid stigande grundvattenyta. I sådana slänter kan det effektiva portrycket vid stabilitetsberäkningar i stort sett antas vara lika med det uppskattade effektiva negativa portrycket.

I områden med planare mark där ingen påtaglig ytavrinning sker, och speciellt i svackor, kan påverkan av nederbörden och snösmältningen på förhållandena i den intermediära zonen vara betydligt större. I dessa fall avser beräkningarna normalt endast bärlighet och då bör ingen hänsyn tas till effekter av negativa portryck såvida inte särskild utredning visar att detta kan göras (7).

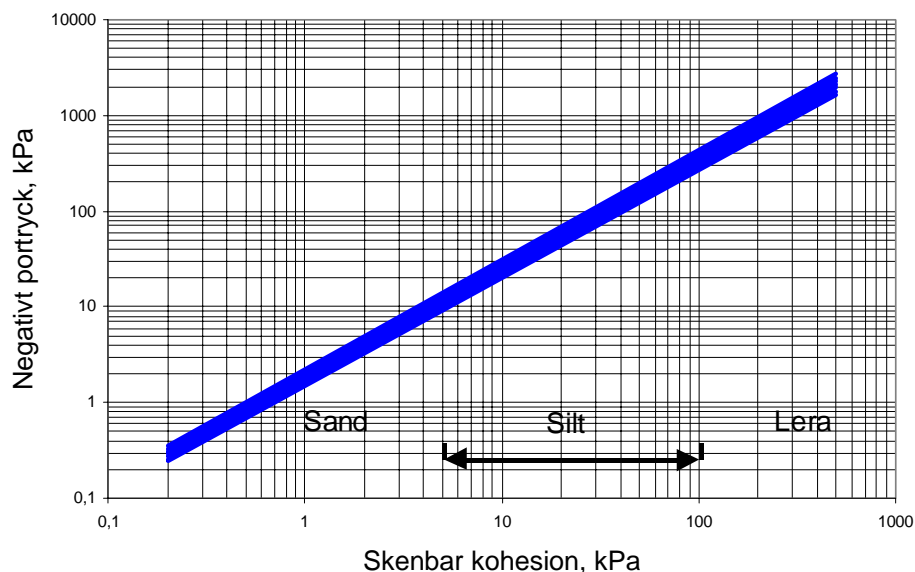


Fig. 2.16
Utvärdering av falsk kohesion ur uppmätt negativt portryck i icke vattenmättad jord (6).

Att läsa vidare:

- (1) **Bear J. (1979).** Hydraulics of Ground Water. Mc Graw Hill, New York.
- (2) **Öberg, A.-L. & Sällfors, G. (1995).** A Rational Approach to the Determination of the Shear Strength Parameters of Unsaturated Soils. Proceedings, 1st International Conference on Unsaturated Soils, UNSAT'95, Paris, Vol. 1, pp- 151-158.
- (3) **Öberg, A.-L. (1997).** Matrix Suction in Silt and Sand Slopes - Significance and Practical Use in Stability Analysis. Avhandling, Chalmers Tekniska Högskola, Inst. för Geoteknik, Göteborg.
- (4) **Andersson, S. & Wiklert, P. (1972).** Markfysikaliska undersökningar i odlad jord – Om de vattenhållande egenskaperna hos svenska jordarter. Grundförbättring, Årgång 25, Nr. 2-3.
- (5) **Larsson, R. (1995).** Jordmaterialet silt - geotekniska egenskaper och deras bestämning. Statens geotekniska institut, Rapport Nr. 49, Linköping.
- (6) **Helenelund, K. V. (1965).** Investigations on the Bearing Capacity and Engineering Properties of Silt. The State Institute for Technical Research, Helsingfors.
- (7) **Larsson, R. (1997).** Investigations and load tests in silty soils - Results from a series of investigation in silty soils in Sweden. Statens geotekniska institut, Rapport nr 54, Linköping.

3. Tjälproblematik

Problem med tjällyftning och tjällossning

- är speciellt uttalade i siltjord
- är beroende av faktorer som jordlagerföljd, klimat och vattentillgång
- kan till stora delar elimineras med olika kombinationer av dränering och isolering

3.1 Allmänt

Om vintern, då medellufttemperaturen är under 0 °C, fryser (tjäl) de övre jordlagren för att åter tina på våren, (tjällossning). I norra Sverige inleds vintern omkring månadsskiftet oktober/november och den avslutas i första halvan av maj, vilket innebär att här är halva året vinter. I södra Sverige är vintern inte lika lång och sammanhängande, utan temperaturen pendlar mera kring fryspunkten under perioden november till mars. En indelning av årstidernas längd i olika klimatzoner med speciellt avseende på tjällossningsperioder har gjorts av Vägverket (1), *Tabell 3.1*. De olika klimatzonerna är numrerade från söder till norr.

Permafrost

Där årsmedeltemperaturen är tillräckligt mycket under 0 °C finns förutsättningar för permafrost, dvs ”ständig tjäle”.

I Sverige förekommer permafrost främst i fjällkedjan och i de mest nordliga delarna av landet. En annan vanlig form av ”permafrost” är de ständigt frusna jordmassor man ofta finner under konstfrusna isbanor och under fryshus som varit i funktion under lång tid. Under senare år har sådan ”permafrost” också kunnat noteras i samband med vissa typer av

jordvärmeanläggningar. I områden med permafrost, oberoende av om den är bildad på naturlig väg eller via mänsklig aktivitet, måste särskild uppmärksamhet riktas mot den termiska balansen när temperaturen i jorden ökar och att permafrosten tinar, vilket ofta kan leda till bärighets- och stabilitetsproblem. En upptining av permafrost åtföljs nästan alltid också av en kompression av jorden, vilken kan uppskattas på basis av den frusna jordens densitet. Ju lägre densitet, desto mera is finns i jorden och desto större blir kompressionen i samband med upptiningen.

Säsongsmässig tjäle

Att lufttemperaturerna är under fryspunkten innebär att vatten i jorden fryser och bildar is, dvs det bildas tjäle. Den frusna jorden kan orsaka en mängd problem, men också utgöra en resurs. Ett exempel på detta är de förbättrade möjligheterna att på vintern ta sig fram i terräng med normalt låg bärighet. Det är dock problemen man i första hand tänker på då man talar om tjäle. Dessa kan i huvudsak grupperas i tre huvudområden:

- Tjälnedträngning och tjäldjup
- Tjällyftning
- Tjällossning och bärighetsreduktion

Dessa tre delområden är naturligtvis koplade till varandra genom att man inte kan ha någon tjällyftning eller tjällossningsproblematik om man inte har någon del av jorden som är frusen. Men detta innebär inte att ett stort tjäldjup med säkerhet medför stor tjällyftning. Inte heller behöver en stor tjällyftning medföra tjällossningsproblem.

Tabell 3.1
Klimatperiodernas
längd uttryckt som
antal dygn under
året (1)

	Klimatzon					
	1	2	3	4	5	6
Vinter	49	80	121	151	166	166
Tjällossningsvinter	10	10				
Tjällossning	15	31	45	61	91	91
Senvår	46	15				
Sommar	153	153	123	77	47	47
Höst	92	76	76	76	61	61

3.2 Tjåldjup

Tjåldjupet i jorden är en direkt följd av temperaturförhållandena på markytan och av värme­flödet från jordens inre ut mot markytan. Normalt antas att jorden har en konstant tempera­ tur som är lika med ortens årsmedeltempera­ tur. Detta gäller i regel på ett djup av 4-6 me­ ter under markytan.

Tjåldjupet är starkt beroende av jordens vattenkvot. Tjåldjupet är därför avsevärt mycket större i grovkorniga, relativt torra, jordar jämfört med tjåldjupet i mera finkorni­ ga och vattenhållande, som silt, lera och speci­ ellt organisk jord.

Tjåldjupet påverkas också av om det före­ kommer material med isolerande effekt i jord­ profilen. Nyfallen snö har t ex ett mycket lågt värmeledningstal och tjåldjupet är därför of­ tast relativt litet i snötäckt terrång. I vägar kan man nyttja markisolering för att reducera tjåldjupet och då nyttjas isoleringsmaterialalets låga värmeledningstal. Ett annat sätt att reducera tjåldjup är att placera ett materiallager som håller stora mängder vatten nära markytan. För att frysa ett sådant vattenrikt lager åtgår en stor köldmångd, eftersom energimångden som måste föras bort är stor (isbildningsvärmets).

Tjålnedtrångningen är snabbast i början av vintern för att gå allt långsammare och stabili­ seras vid ett maximalt tjåldjup som i regel uppnås i slutet av februari. Upptiningen under våren sker på ett likartat sätt, dvs den är snab­ bast i början och går med tiden allt långsam­ mare. Största delen av tjålen tinar från mark­ ytan och nedåt (ca 90 %) och resten (ca 10 %) nerifrån och upp, som följd av värme­flödet från djupare liggande ofrusna jordlager.

3.3 Tjålljftning

Då en finkornig jord, som silt, fryser kan un­ der vissa förhållanden en isanrikning ske i den frysan­ de jorden. Detta tar sig ofta uttryck i att en stor mångd islinser bildas. Dessa varierar i tjocklek, allt efter fryshas­ tighet, jordart, vattentillgång, belastning m m. Tjockleken hos varje enskild islins kan variera från enstaka millimet­ rar till flera centimeter. I ex­ trema fall kan enskilda islinser ha tjocklekar på flera deci­ meter. Dessa mycket tjocka islinser uppkommer som regel i grånser mellan olika materialtyper. Den samman­ lagda tjockleken på islinserna ger upphov till tjålljftning av

markytan. Islinserna växer till i värme­flödets riktning. Eftersom detta i regel är vinkelrätt mot markytan är islinserna ofta orienterade parallellt med denna.

För att islinser ska uppkomma måste det, förutom att temperaturen ska vara under noll grader, även finnas tillgång till vatten som kan frysa samt finkornig jord. Dessa tre villkor måste *samliga* vara uppfyllda. Det är således inte tillräckligt att enbart studera jordens korn­ storleksfördelning för att avgöra huruvida tjåll­ jftningar uppkommer eller inte.

Orsaken till att islinser bildas i finkornig jord beror på hur vattnet är bundet till mine­ ralpartiklarnas ytor. Ju fastare vattnet är bun­ det till partikelytorna, desto lägre temperatur kråvs för att vattnet ska frysa. Detta innebär att det finns ett samspel mellan sådant vatten som frusit till is och sådant som fortfarande är ofruset, trots att temperaturen är under noll grader. Trycket i det fortfarande ofrusna vatt­ net är lågt och det uppstår därmed ett sug. Ju mindre andelen ofruset vatten är, desto lägre är trycket. Det låga trycket medför att vatten sugs in i den frusna jorden. Att vatten alls kan transporteras in i frusna partier, beror på att det ofrusna vattnet fungerar som "kanaler", *Fig. 3.1*. Vattnet sugs in i de partier av jorden där optimala förutsättningar råder mellan permeabilitet och undertryck. Här fryser vattnet till is och bildar en islins. Medan detta sker, rör sig tjållgrånsen neråt, varför de optimala förhållandena successivt förskjuts. En given islins växer i tjocklek tills de optimala förut­ sätningarna återfinns på ett annat ställe. Då slutar den växa och en ny islins bildas. Detta ger upphov till den för silt så typiska "rytmis­ ka isbandningen".

I en grovkornig jord är permeabiliteten hög, men här är oftast tillgången till vatten begrån­ sad eftersom denna jord är "sjålvdrånerande"

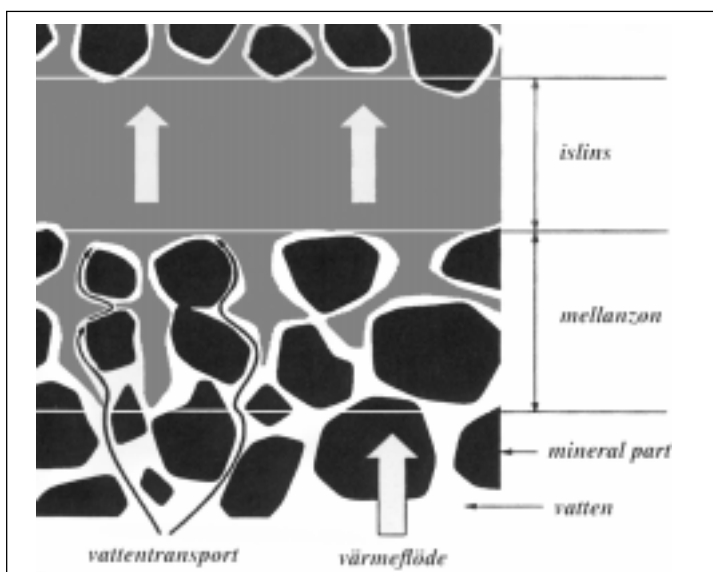


Fig. 3.1
Schematisk bild av processen vid bildning av islinser med vattentransport i ofruset vatten närmast mineralpartiklarna.

och har låg kapillaritet. I grovkornig jord är också mängden ofruset vatten närmast kornen liten, eftersom mineralen i denna typ av jord har liten förmåga att binda vatten till partikel-ytan. Sammantaget medför detta, att för denna typ av jord får man inga eller mycket små tjällyftningar. Detta gäller även om vattentillgången är god, som till exempel under grundvattenytan.

Jordar som har hög kapillaritet har i regel också god vattentillgång, vilket är en förutsättning för stora tjällyftningar. För att tjällyftningen skall hinna utbildas under den kalla perioden fordras samtidigt att permeabiliteten är hög. Störst tjällyftning förekommer därför i jordar som är siltrika, se Fig. 3.2.

I en lera är permeabiliteten så låg att vatten inte hinner sugas upp i någon större utsträckning under vintern. Tjällyftningarna blir därför oftast små och lera betraktas normalt som måttligt tjälfarlig. Om däremot de negativa temperaturerna kvarstår under lång tid, som under fryshus och isbanor, är förhållandena annorlunda. Då kommer islinser att kunna växa i tjocklek med tiden och stora tjällyftningar att utvecklas.

I jordprofiler där det förekommer skikt med grövre vattenförande material kan tjällyftningarna bli riktigt stora genom att tillgången på vatten upprätthålls under vintern. I normalfall är infiltrationen begränsad under vintern och grundvattenytan sjunker allteftersom vatten sugas upp i den fryssande delen av jorden eller strömmar bort mot vattendrag i lägre terräng.

Alla åtgärder som minskar vattentillgången i en fryssande jord medför som regel minskade tjällyftningar. Andra sätt att kontrollera situationen är att se till att tjälldjupet är litet, så att fryssfronten inte når ner i de delar av jordprofilen där vattentillgången är god.

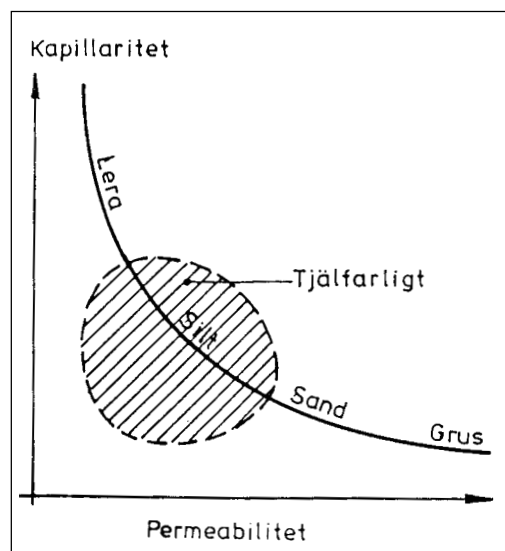


Fig. 3.2
Samband mellan kapillaritet och permeabilitet. Silten uppfyller båda kriterierna för stor tjällyftning.

Ett snabbt frysförlopp ger ofta upphov till mindre islinnsbildning än ett långsamt. Orsaken är att vatten inte hinner transporteras upp till den fryssande jorden om denna fryser snabbt. Går frysförloppet långsamt hinner vatten att transporteras längre sträckor.

Att använda en enkel klassificeringsmetod med hänsyn till tjällyftningsbenägenheten, likt den som t ex används i VÄG 94 (1), kan i många fall vara praktiskt. Men en sådan enkel klassificering tar ingen större hänsyn till t ex vattentillgången, varför man måste använda metoden med försiktighet. Arbete pågår med att ta fram förbättrade klassificeringsmetoder.

I dag finns ett antal metoder för att beräkna tjällyftningsarnas storlek. Det finns såväl teoretiska modeller, datorprogram för beräkning av islinsernas och tjälfrontens läge, halvempiriska metoder som rent empiriska metoder (2, 3, 4, 5, 6, 7, 8). Beräkning av tjällyftning är dock ofta komplicerad och kräver en viss kompetens inom området.

3.4 Tjällossning

Tjällossning innebär att isen i den isanrikade jorden tinar och bildar vatten. I huvudsak sker upptiningen från markytan och neråt. Har jorden genomgått en tjällyftning innebär detta att jorden erhållit ett nettotillskott av vatten, som under vintern varit bundet i form av is. När isen tinar bildas vatten och eftersom mängden vatten i jorden ofta ökat utöver vad porsystemet rymmer, uppkommer ett vattenöverskott. Detta medför att porvattentrycket ökar, varvid effektivtrycket och därmed hållfastheten minskar. Detta påverkar direkt bärigheten, som under ogynnsamma förhållanden kan sjunka till praktiskt taget noll.

Upptiningshastigheten har en avgörande betydelse för om tjällossningsproblem skall uppstå eller inte. Sker upptiningen snabbt och permeabiliteten i jorden är låg, alternativt att dräneringsvägen är lång, kommer inte det vatten som bildas av den smältande isen att hinna dräneras undan i samma takt som nytt vatten bildas av smältande is. I detta fall utbildas höga porvattentryck och bärighet och stabilitet reduceras. Om däremot upptiningen går långsamt hinner vattnet dräneras undan i samma takt som det frigörs. I detta fall uppstår inga tjällossningsproblem av ovan nämnda typ, trots att mängden is kan ha varit avsevärd i jorden och tjällyftningen varit stor.

Vädret under våren har alltså en avgörande betydelse för om tjällossningsproblemen ska bli små eller stora. Att tjällyftningen varit särskilt stor är således ingen förutsättning. Tjällossningsproblem kan uppkomma även efter en mild vinter, med små tjällyftningar. En

gynnsam vår ur tjällossningssynpunkt, är en situation med några plusgrader i luften under dagtid och någon minusgrad under nätterna som pågår under en relativt lång tid. I detta fall kommer upptiningen att ske långsamt och det av isen bildade vattnet hinner att dräneras undan i samma takt som det bildas. Inget kvarstående vattenöverskott och inga höga porvattentryck uppkommer då. Den sämsta tänkbara situationen är då en vinter med stora tjällyftningar övergår i en varm vår med höga temperaturer under såväl dag som natt. Kombinerat detta med nederbörd i form av regn blir problemen särskilt stora.

Också belastningarna har betydelse. Är belastningen dynamisk, uppkommer flytfenomen lättare i den vattenanrikade siltiga jorden än om belastningen är enbart statisk. Detta är ett av skälen till att bärighetsproblem på små vägar i regel avsevärt förvärras om vägarna trafikeras under tjällossningstiden. När så sker, medför trafiken en dynamisk belastning som genererar ytterligare porvattentrycksökningar.

Det som är avgörande för om tjällossningsproblem ska uppkomma eller inte, är således främst relationen mellan upptiningshastighet och jordens förmåga att dränera bort det frigjorda vattnet. Den senare kan uttryckas som konsolideringskoefficienten för tinande jord. Denna är i regel inte numeriskt lika med den för ofrusen jord, utan kräver särskild utredning.

Åtgärder som vidtas för att reducera tjällossningsproblem skall alltså vara sådana som:

- minskar mängden is i jorden (dvs begränsar tjällyftningarna)
- minskar upptiningshastigheten
- förbättrar dräneringssituationen (ökar permeabiliteten eller minskar dräneringsvägens längd)

Upptiningshastigheten kan påverkas genom markisolering. Isoleringen inte bara minskar tjällyftningarna utan upptiningshastigheten reduceras också. Förhållandet mellan upptiningshastighet och dräneringsförmåga blir då lägre och därmed blir de porvattenövertryck som uppkommer lägre.

Dräneringssituationen kan t ex påverkas med hjälp av geotextiler av olika slag, eller genom att dränerande lager byggs in i konstruktionen med jämna mellanrum, (se Fig. 1.4). Väl fungerande diken längs vägar är en annan väsentlig faktor.

Att läsa vidare:

- (1) **Vägverket (1994)**. VÄG 94. VV publikation 1994:86, Vägverket, Borlänge.
- (2) **Knutsson, S. (1995)**. Tjäle - är det något att intressera sig för? Bygg och Teknik, Vol. 87, No. 8.
- (3) **Knutsson, S. (1994)**. Tjälningprocessen och beräkning av tjäldjup, Kompendium. Luleå tekniska universitet, Avdelningen för geoteknik, Skrift 94:6, Luleå.
- (4) **Saarelainen, S. (1992)**. Modelling frost heaving and frost penetration in soils at some observation sites in Finland. VTT Publications 95, Espoo.
- (5) **Kujala, K. (1993)**. Evaluation of factors affecting frost susceptibility in soils. Proceedings, Second International Symposium on Frost in Geotechnical Engineering, Anchorage, pp. 83-88.
- (6) **Sheng, D. & Knutsson, S. (1993)**. Sensitivity analysis of frost heave. Proceedings, Second International Symposium on Frost in Geotechnical Engineering, Anchorage, pp. 3-17.
- (7) **Sheng, D, Axelsson, K. & Knutsson, S. (1994)**. Estimation of frost heave for stratified soil profile. Proceedings, Seventh International Symposium on Ground Freezing, Nancy, pp. 129-141.
- (8) **Stenberg, L. (1997)**. Frystest för dimensionering av tjälskydd. Statens väg- och transportforskningsinstitut, VTI notat Nr 42-1997, Linköping.

Tjällossningsproblem eller inte, är främst relationen mellan upptiningshastighet och jordens förmåga att dränera bort det frigjorda vattnet.

4. Fältundersökning

Normal arbetsgång för fältundersökning av siltjord:

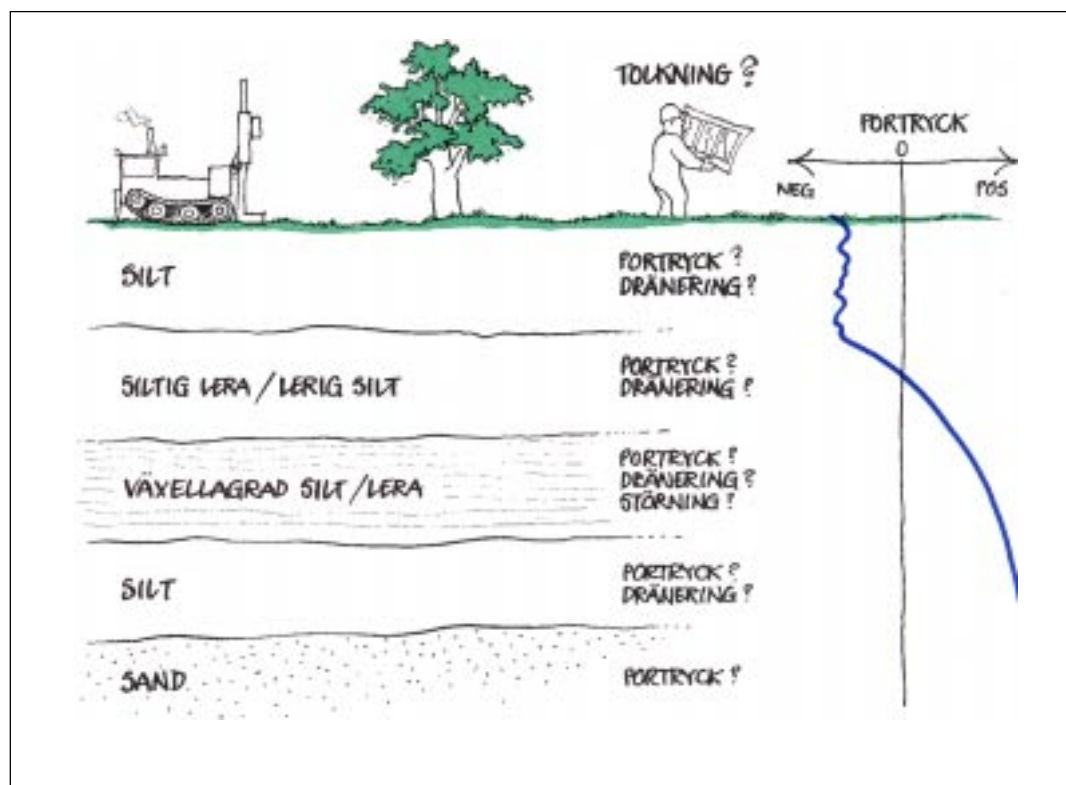
Undersökningar i fält

- Utför CPT-sondering med portrycksmätning och mätning av portrycksutjämning.
- I fast siltjord och siltjord med grövre inslag, komplettera med hejarsondering.
- För verifikation av jordartsklassificeringen, ta prover (helst med kolvprovtagare).
- Finns lager av lös lera, ta ostörda prover i dessa.
- Fastställ grundvattenförhållandena.
- För noggrannare bestämning av kompressionsegenskaper, utför dilatometerförsök.

Mätning av portryck

- Positiva porvattentryck under grundvattentytan mäts på vanligt sätt.
- Grundvattentytans fluktuation mäts och extremvärden prognosticeras. Finns flera grundvattenmagasin mäts också variationerna hos trycknivåerna i dessa.
- Negativa portryck mäts med BAT-spetsar med speciella filter och speciell installationsteknik.
- Vid långtidsmätning av negativa portryck måste portrycksspetsarna avluftas regelbundet.
- I den (de) intermediära zonen (zonerna) räcker det normalt att mäta de negativa portrycken och tillhörande vattenmättnadsgrader vid ett tillfälle.

Frågeställningar vid undersökningar i fält.



4.1 Förutsättningar för fältundersökning av silt

Resultaten av fältundersökningar i silt är beroende vilken grad av dränering som skett under försöket. Endast metoder i vilka denna kan uppskattas och man kan ta hänsyn härtill vid utvärderingen av resultaten bör användas. Undantagen är mycket fast siltjord eller siltjord med grövre inslag, t ex grus och sten, där grövre metoder måste tillgripas för att utrustningen skall kunna drivas ned.

För friktionsjord bedöms hållfasthets- och deformationsegenskaperna utifrån resultat av sonderingar eller provningar i fält. Tolkningarna förutsätter som regel att jorden under sonderingen, respektive provningen, varit dränerad. Detta är oftast inte fallet i siltjord. Samtliga sonderingsmetoder utförs med så hastig neddrivning att endast ensgraderad grovsilt kan antas vara dränerad under sonderingen. På motsvarande sätt utförs de flesta provningar i fält så hastigt att silt endast i undantagsfall kan antas vara helt dränerad.

Å andra sidan är silt så permeabel att man inte heller kan anta att jorden är helt odränerad under sondering och provning, varför de utvärderingsmetoder som används för kohesionsjord inte heller kan antas vara tillämpliga. I de flesta metoder mäts inga portryck under sonderingen eller provningen i fält, utan bedömningen av giltigheten för empiriska utvärderingar av resultaten baseras på jordartsklassificeringar av upptagna prover. Detta medför en avsevärd osäkerhet i bedömningar och utvärderingar.

Resultaten från sondering och provning i fält är också starkt beroende av portryckssituationen och de effektiva spänningarna i jorden. Detta måste beaktas vid tolkning och utvärdering av resultaten samt vid bedömning av giltigheten för de utvärderade egenskaperna vid andra portryckssituationer. Möjlighet att beakta portryckssituationen finns dock endast för ett begränsat antal undersökningsmetoder. I silt ovan den fria grundvattenytan måste de negativa portrycken mätas eller uppskattas på annat sätt för att man skall kunna utvärdera sonderingar och provningar i fält.

Silt är mycket störningskänslig. Vid såväl sondering och installation av provningsutrustning som vid provtagning in-situ medför silt och skiktade jordar speciella problem med störning av jorden. Likaså kräver ”ostörda” siltprover, speciellt med löst lagrad silt, mycket stor varsamhet vid transport och hantering av proverna.

4.2 Arbetsgång

Fältundersökningar i siltjordar startar med sondering för bestämning av jordlagerföljd och fasthet samt grundvattenobservationer. Som första alternativ för sonderingsmetod väljs CPT-sondering med portrycksmätning. Med denna metod får man den bästa bilden av jordlagerföljden och jordens fasthet. Genom att stoppa sonderingen och studera portrycksutjämnningen i permeabla lager och skikt erhålls dessutom ofta en god bild av portryckprofilen i jorden.

Om jorden är så fast att CPT-sonden inte kan drivas ned till erforderligt djup, får man övergå till hejarsondering. I mycket fast jord med grövre inslag kan jord- bergsondering bli aktuell.

Provtagning för att verifiera jordartsklassificeringen skall alltid göras i minst en undersökningspunkt om sonderingsresultaten visar på likartade förhållanden inom det undersökta området och i annat fall i erforderlig omfattning för att säkert fastställa jordlagerförhållandena.

Visar CPT-sonderingarna på skikt eller lager med lera kan ostörd provtagning med kolvborr bli aktuell. Detta gäller främst då sättningar är av intresse och då överkonsolideringen inte med säkerhet kan bedömas vara tillräcklig för att inga större sättningar skall uppstå. I lager med lerig jord kan vingförsök utföras för en säkrare bedömning av den odränerade skjuvhållfasthet. Provtagning skall också göras i skikt och lager där jordarten inte kan uttolkas ur sonderingsresultaten eller om prover behövs för bestämning av egenskaper som kornstorleksfördelning, densitet, permeabilitet, vattenbindningsförmåga, organisk halt etc. För bestämning av en del av dessa parametrar, speciellt i tjocka homogena skikt, kan det räcka med störd skruvprovtagning. Kolvprovtagning ger dock bättre underlag, då jordens struktur bibehålls och olika skikt och varv inte rörs om och blandas.

Kompletterande portryckmätning görs i de fall portryckprofilen inte kan klarläggas ur CPT-sonderingen eller då grundvattenytan ligger lågt och stora negativa portryck kan antas råda. Mätning av negativa portryck är relativt komplicerat och kan ibland ersättas av en indirekt uppskattning med ledning av jordens vattenkvot och kornstorleksfördelning.

Överslagsberäkningar av sättningar i siltjord görs oftast på basis av sonderingsresultaten. De moduler som utvärderas ur sonderingsresultat blir ofta för låga i överkonsoliderad jord. Detta påverkar speciellt de beräknade sättningarna i de övre jordlagren som har den största inverkan vid ytliga belastningar med

Silt är mycket störningskänslig.

Portryck, såväl rådande som genererade, har en stor betydelse.

I skikt med grövre silt och grovkornigare jord utjämnas porövertrycken ofta inom 5 minuter.

begränsad utbredning, t.ex. plattgrundläggning. Om en noggrannare bedömning av sättningarna krävs, utförs i första hand dilatometerförsök. Pressometerförsök kan också utföras. Dessa är dock svåra att utföra under grundvattenytan i siltjord och resultaten i jord med negativa portryck kan vara missvisande.

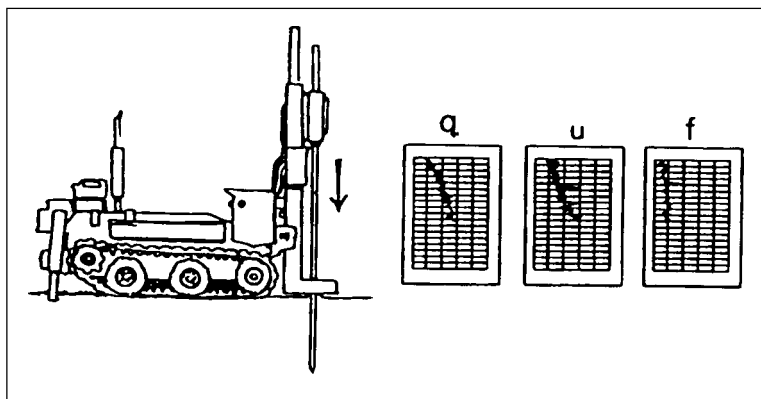
I områden där jordlagerföljden redan är känd och där undersökningarna främst avser att bestämma jordens kompressionsegenskaper kan dilatometerförsök utföras utan föregående CPT-sondering. Dilatometerförsöken ger också en god grund för jordartsklassificering och bestämning av jordlagerföljd. Eftersom mätningarna inte är kontinuerliga och endast värden med 0,2 m avstånd i djupled erhålls kan jordprofilen dock inte registreras lika detaljerat som vid CPT-sondering.

I de fall man vill bestämma de dynamiska skjuv- och elasticitetsmodulerna i jorden kan CPT-sonderingen kombineras med samtidig mätning av skjuvvågshastigheten (1).

4.3 Sondering

4.3.1 CPT-sondering

Förberedelse, utförande och utvärdering av CPT-sondering beskrivs detaljerat i SGI Information 15 (2) och SGF rekommenderad standard (3). Nedan beskrivs sådana förhållanden som är speciella för undersökningar i silt.



■ Utförande

Vid CPT-sondering i siltjord skall normalt en 5-tons sond med portrycksmätning användas. En utrustning som också tillåter registrering av portrycksutjämnningen bör användas. I mycket fast silt kan sonder med högre kapacitet bli aktuella. Portrycksmätarens kapacitet innebär normalt inte någon begränsning utom i de fall silten underlagras av lera till stora djup. Däremot är dess temperaturstabilitet, noggrannhet och upplösning av betydelse om portryckssituationen skall kunna fastställas med tillräcklig noggrannhet.

Vid sondering genom den övre, ofta icke vattenmättade zonen, och genom fastare silt uppstår negativa portryck vilka ofta motsvarar vakuum. Det ställs därför stora krav på avluftning av vätskor och vätskemättnings av filter, hålrum och kanaler i sonden. Vid sondering i siltjord är vatten normalt olämpligt som tryckmedium. När vanliga filter används rekommenderas främst glycerin. Spaltfilter med fett eller gelatin är ett lämpligt alternativ när det visar sig svårt att behålla vätskemättnaden. Sonderingarna utförs enligt av SGF rekommenderat standardförfarande (3). Detta tillåter kortare stopp i sonderingen under några minuter för t.ex. omtag och seismiska mätningar. Efter en inledande sondering med så få och korta stopp som möjligt kan man använda detta för att mäta portrycksutjämningsförlopp under de efterföljande sonderingarna. När portrycksregistreringen visar att grundvattenytan passerats bör man stanna på ett antal nivåer och studera utjämnningen av porövertrycken med tiden, till en början lämpligen i samband med omtag och påskärning av nya stänger. I skikt med grövre silt och grovkornigare jord utjämnas porövertrycken ofta inom 5 minuter och de rådande in-situ portrycken kan då registreras. I övrig jord erhålls ett relativt mått på dräneringsegenskaperna som kan användas vid bedömning av jordens uppträdande vid olika typer av belastning.

Efter någon eller några inledande sonderingar börjar bilden av jordlagerföljden klarna. Sonderingsstoppen kan då väljas så att egenskaper i valda lager, där bedömningen av dräneringsförhållandena är tveksam, kan studeras och utjämnade portryck i dränerande lager och eventuella skilda grundvattenmagasin kan mätas. Alla sonderingar som avbryts i grövre bottenlager under finkornig jord bör avslutas med en mätning av portrycksutjämningsförloppet och, om möjligt, det rådande porvattentrycket i dessa lager. Att vänta längre än 5 minuter är dock inte rationellt. Har portrycksutjämnning inte inträffat efter denna tid bör portrycksprofilen normalt mätas med portryckspetsar. Mätning av portrycksutjämningsförlopp kan endast göras i vattenmättad jord på nivåer där in situ portrycken är positiva.

Om det visar sig att de utjämnade vattentrycken i underliggande vattenförande jordlager är artesiska bör sonderingshålen tätas med bentonit direkt efter sondens uppdragning. I annat fall kan problem uppstå med inre erosion på grund av uppströmmande vatten och också i samband med eventuella schaktningsarbeten vid efterföljande grundläggningsarbeten. Detsamma gäller för andra vertikala hål som skapas av portrycksmätare, provtagning etc.

Speciell uppmärksamhet bör riktas mot konditionen hos tättningsringar och rengöring av sonden. Silt har en mycket stor förmåga att tränga in i spalter och kan då påverka mätresultaten under sonderingarna.

Den rådande portrycksprofilen behövs för utvärdering av CPT-sonderingen. Tryckprofilen kan normalt inte antas vara hydrostatisk, utan portrycken bör ha uppmätts på ett antal nivåer. Ovanför grundvattenytan är portrycken negativa. Vid en djupt liggande grundvattenyta kan dessa negativa portryck vara stora och en stor del av jordprofilen liksom sonderingsresultaten vara påverkade härav. De negativa portrycken bör helst mätas, men kan också preliminärt uppskattas ur sonderingsresultaten tillsammans med kornfördelningar och vattenkvoter som uppmätts i upptagna prover. Det skall observeras att i växellagrad jord med grövre lager av sand/silt och finkornigare lager av finsilt/lera kan flera grundvattenakvifärer med olika grundvattenytor förekomma vilket fordrar en omfattande bestämning av grundvattenförhållandena, jfr Kapitel 2.

■ Tolkning

Resultaten av CPT-sonderingar kan utvärderas med hjälp av datorprogrammet CONRAD (2). Detta har reviderats under 1997 för att kunna ta hänsyn även till negativa portryck och andra erfarenheter från siltjord.

Det genererade portrycket, Δu , används för okulär kontroll och bedömning av jordartsklassificering och överkonsolideringsgrad, samt för den automatiska klassificeringen i leriga jordar. Bedömning av de genererade portrycken, speciellt när dessa är små/eller negativa fordrar att en noggrann bestämning av in-situ portrycket, u_0 , gjorts. Om inga portrycksförändringar genereras tyder detta på mellansand eller grövre jord. Mycket låga genererade portryck i lös jord tyder på finsand/grovsilt. Negativa portryck i relativt lös jord tyder på en påtaglig överkonsolidering. Höga genererade portryck i förhållande till spetsstrycket (hög portryckskvot) tyder på lera. För de relativt låga portryck som genereras i fastare jord är tolkningen inte lika entydig.

I utvärderingen används det effektiva överlagringstrycket,

vilket är större än det totala överlagringstrycket i de jordlager där negativa portryck råder. Om inte hänsyn tas till de negativa portrycken kommer jorden att klassificeras som grövre än den i verkligheten är och risk finns dessutom att de effektiva hållfasthetsparametrarna över-skattas.

Jordartsklassificering utförs i ett första steg på basis av relationen mellan uppmätt spetsstryck, q_T , uppmätt friktion, f_T , och uppskattat effektivt överlagringstryck, σ'_{v0} , Fig. 4.1.

I programmet CONRAD finns också vissa spärrar så att jorden inte klassificeras som silt om de genererade porövertrycken är mycket höga. Om jorden i det första steget klassificerats som lera används det genererade porövertrycket för en mer detaljerad indelning av denna jord i ett andra steg. Jordartsklassificering ur CPT-sondering med program som använder empiriska relationer anger vilken ensgraderad jordfraktion de uppmätta parametrarna närmast motsvarar. Någon noggrannare klassificering som anger verklig kornfördelning kan

Om inte hänsyn tas till de negativa portrycken kommer jorden att klassificeras som grövre än den i verkligheten är.

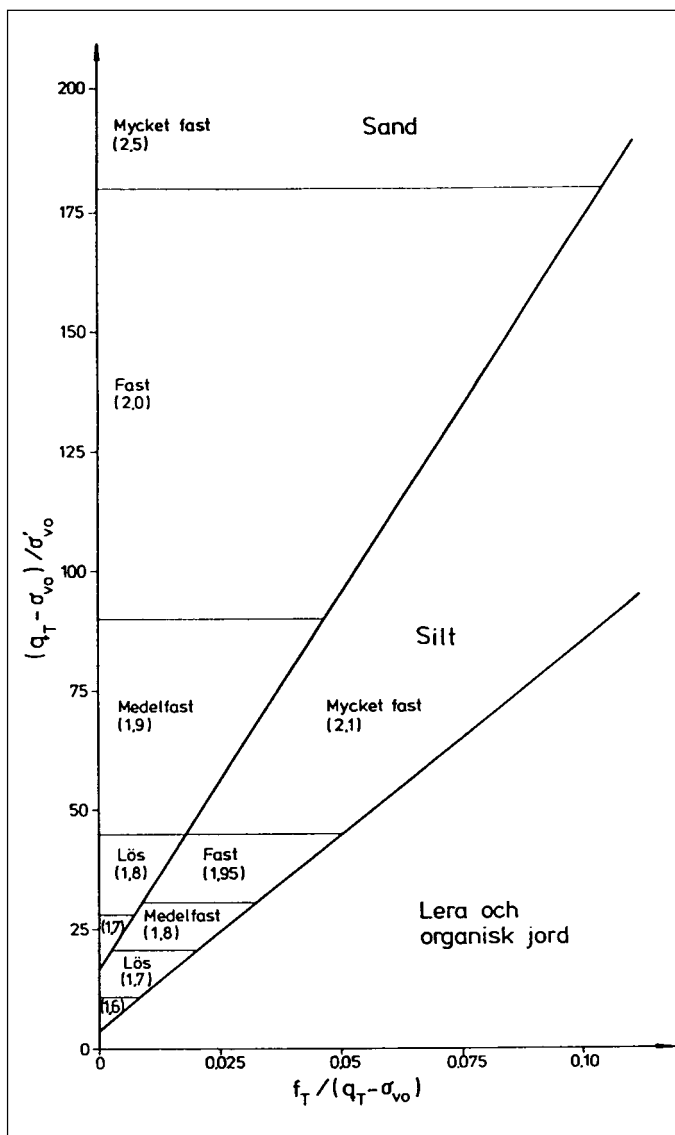


Fig. 4.1
Utvärderingsdiagram för silt och sand med skiljelinje för kohesionsjord. Siffror inom parentes anger uppskattad vattenmättad skrymdensitet i t/m^3 .

Det är främst i mycket lerig silt och i lera som den odränerade skjuvhållfastheten kan utvärderas ur CPT-sonderingar.

inte göras och klassificeringen av månggraderade jordar blir därför alltid i viss mån missvisande. Programmet CONRAD är avsett att användas interaktivt av användaren och en manuell bedömning skall alltid göras liksom kontroll mot upptagna prover. Den automatiska utvärderingen av jordarterna i profilen kan vid behov justeras.

På motsvarande sätt utvärderas en tunghet hos jorden som motsvarar normalvärdet för den utvärderade jordfraktionen vid den bedömda relativa fastheten då mineralsammansättningen är den normala. Detta medför att densiteten för månggraderade jordar ofta underskattas och att den utvärderade densiteten inte gäller för t ex kalkjord. Om prover har tagits med en sådan kvalitet att densiteten kan bestämmas kan den automatiskt utvärderade densiteten och överlagringstrycken justeras. Alternativt kan normala riktvärden för tunghet hos jord användas. Dessa erhålls med ledning av jordartsklassificeringen i laboratoriet och bedömd fasthet ur sonderingsresultaten.

I de lager där portrycksutjämningsförloppen har studerats kan jordens relativa dräneringsegenskaper uppskattas. Om mindre än 20 % av de genererade porövertrycken kvarstår efter 5 minuter kan jorden normalt betraktas som så fridränerande att de portryck som genereras under upplastningen vid normala statiska belastningsfall försvinner i samma takt som belastningen påförs. Någon större hydrodynamisk fördröjning av konsolideringsförlopp kan därmed inte förväntas och dränerade hållfasthetsegenskaper är normalt relevanta. Undantag är främst olika former av dynamisk belastning och andra mycket hastiga lastväxlingar där också odränerade förhållanden måste beaktas.

Om mer än 60 % av de genererade porövertrycken kvarstår efter 5 minuter kan jordens dräneringsförhållanden liknas vid dränering i lera. En betydande hydrodynamisk fördröjning av konsolideringsförlopp kan då förväntas också vid vanliga lastfall och odränerad skjuvhållfasthet måste alltid beaktas.

För de fall där de kvarstående portrycken efter 5 minuter ligger mellan 20 och 60 % får dräneringsförhållandena för det aktuella belastningsfallet bedömas med ledning av belastningens geometri och tiden för upplastning, aktuella lagertjocklekar, avstånd till dräneringsgränser m.m. I många fall är det välbetänkt att kontrollera den verkliga utvecklingen under kritiska skeden genom portrycksobservationer. Observationerna av utjämningsförloppen kan också användas till att bedöma tillämpligheten för andra metoder i vilka portrycken inte mäts under provningen.

Den *odränerade skjuvhållfastheten* måste bedömas med ledning av genererade portryck, jordartsklassificering från upptagna prover samt eventuella uppmätta portrycksutjämningsförlopp. Kan man med ledning av detta anta att jorden på den aktuella nivån uppträtt odränerat under sonderingen kan också den utvärderade odränerade skjuvhållfastheten antas ha en viss giltighet, annars inte. Det är främst i mycket lerig silt och i lera som den odränerade skjuvhållfastheten kan utvärderas ur CPT-sonderingar. I profiler med växellagrade tunna skikt och omväxlande varv av lera och silt blir störningen ofta kraftig vid CPT-sondering. Vidare påverkas utvärderingen av jordens konsistensgränser och ett rättvisande flytgränsvärde för en växellagrad jord är svårt att bestämma. Skjuvhållfasthetsbestämningen i en sådan jord blir därför relativt osäker.

Den odränerade skjuvhållfastheten, τ_{fu} , utvärderas enligt

$$\tau_{fu} = \frac{q_T - \sigma_{v0}}{N_{kT}}$$

där faktorn N_{kT} för silt kan sättas till 14,5.

Giltigheten för *dränerade hållfasthetsparametrar* utvärderade ur CPT-sondering i silt fordrar en motsvarande noggrann bedömning. Om *inga påtagliga portryck* genererats under sonderingen, (portrycksfaktorn $B_q = (\Delta u / (q_T - \sigma_{v0}) \leq 0,03)$), kan friktionsvinkeln utvärderas med samma metoder som används för grövre friktionsjord, (sand), Fig. 4.2 (4, 5).

Om *större portrycksförändringar* genererats kan nedanstående utvärderingsmetod för effektiva hållfasthetsparametrar användas med vissa förbehåll (5). Det faktum att höga genererade portryck uppmäts betyder att sonderingen skett under odränerade eller endast delvis dränerade förhållanden. Detta innebär att de utvärderade hållfasthetsegenskaperna gäller för fall med konstant volym eller begränsade möjligheter till volymändring. *Resultaten kan därför endast användas för fall med konstanta eller sjunkande spänningsnivåer*, t.ex. stabilitet i naturliga slänter, schaktslänter etc, men inte i belastningsfall som innebär en pålastning.

Först studeras kurvorna för spetstryck och portryck mot djupet och eventuellt ritas ytterligare ett diagram med nettospetstrycket, $(q_T - \sigma_{v0})$, mot det effektiva överlagringstrycket, Fig. 4.3.

För det aktuella djupintervallet bedöms karakteristiska värden för q_T , σ_{v0} , Δu och a , där $a = c' \cdot \cot \phi$. Den grafiska utvärderingen av a kan vara problematisk, speciellt vid varierande jordlager och skiktad jord. I de flesta

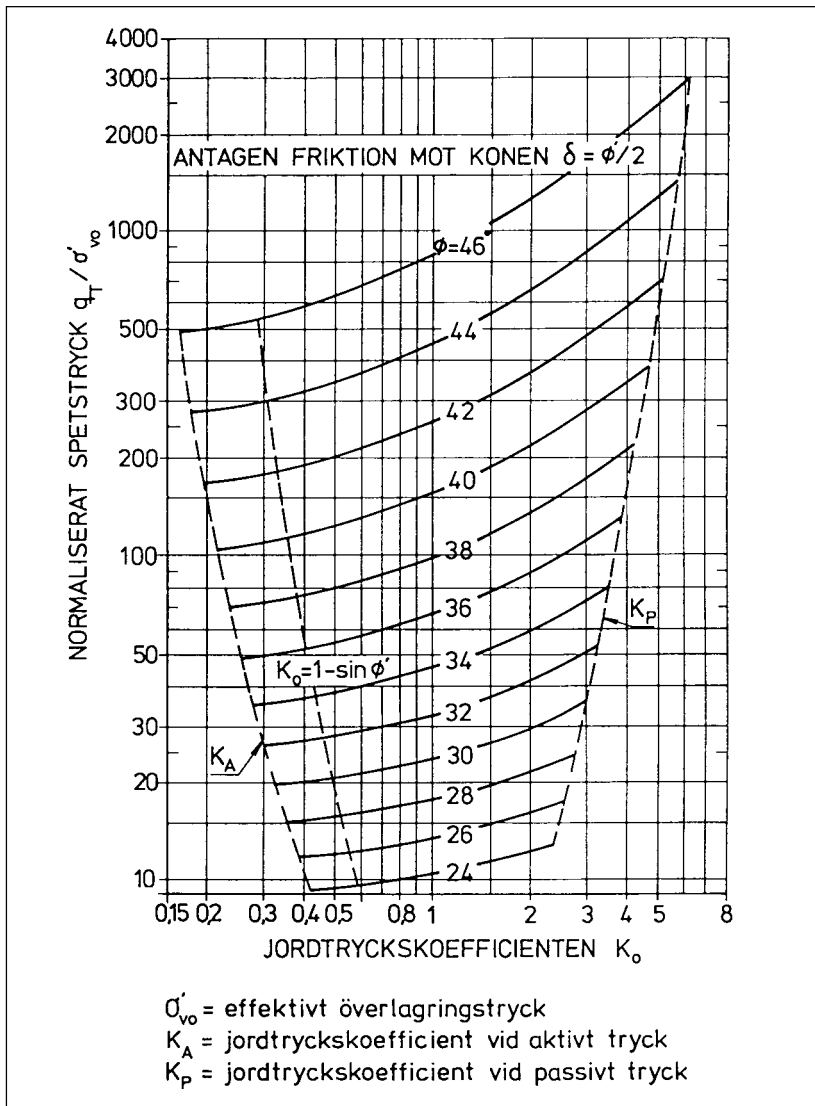


Fig. 4.2
Diagram för utvärdering av friktionsvinkeln ur resultat från CPT-sondering (4).

fall antas dock a -värdet, vilket normalt är av underordnad betydelse, med ledning av jordartsklassificeringen enligt Tabell 4.1.

För fall med *ökande belastningar*, t.ex. bärförmåga för plattor, bör man använda empiriska erfarenhetsvärden på friktionsvinkeln som utvärderas med ledning av jordart och bedömd fasthet. I princip görs detta enligt de riktlinjer som anges i Plattgrundläggningshandboken

(6) och Vägverkets rekommendationer (7). Då en CPT-sond med portrycksmätning har använts och hänsyn har tagits till eventuella negativa in-situ portryck kan förfarandet modifieras något (8). Då används för silt den jordartsklassificering och relativa fasthet som bedöms ur sonderingsresultaten enligt Fig. 4.1. Empiriska värden för friktionsvinkeln erhålls sedan ur Tabell 4.2.

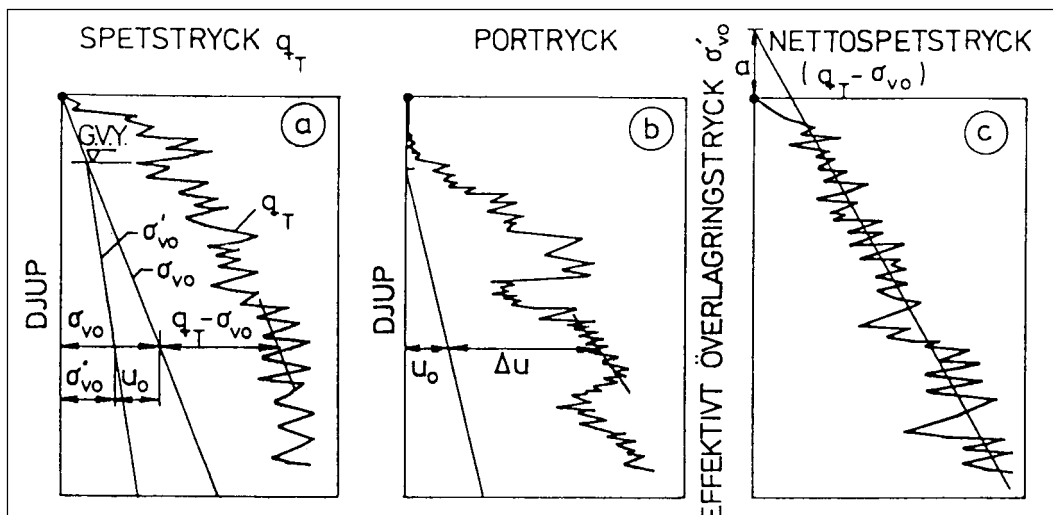


Fig. 4.3
Presentation av resultat från CPT-sondering och erforderliga parametrar för utvärdering av effektiva hållfasthetsparametrar (5).

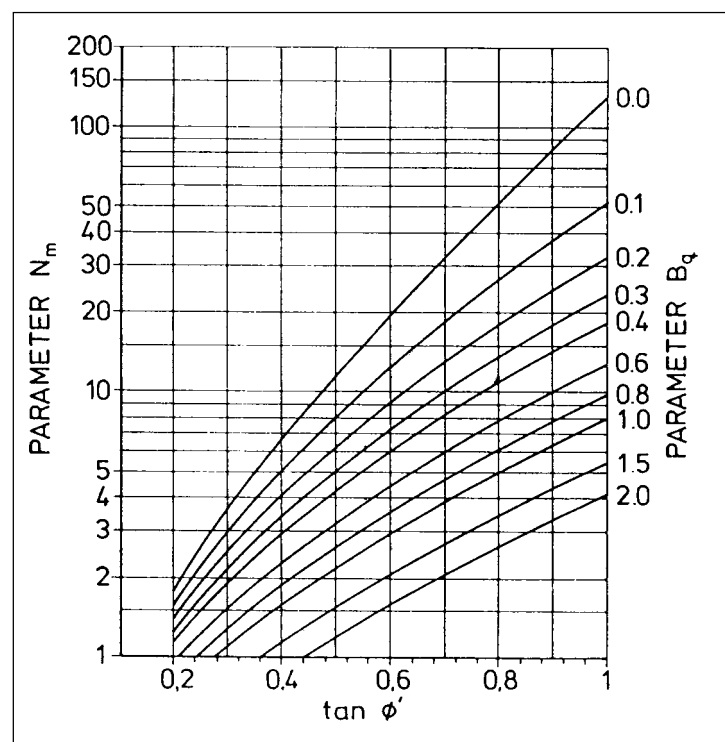
Tabell 4.1
Typiska värden
för hållfasthets-
parametern a
(respektive c') (5).

Jordart	Hållfasthetsparameter a respektive c'	
	a kPa	c' kPa
Lera lös	5 - 10	2 - 4
Lera medelfast	10 - 20	4 - 10
Lera fast	20 - 50	10 - 30
Silt lös	0 - 5	0 - 3
Silt medelfast	5 - 15	3 - 9
Silt fast	15 - 30	9 - 20
Sand lös	0	0
Sand medelfast	10 - 20	6 - 15
Sand fast	20 - 50	15 - 45

Parametrarna $B_q = \Delta u / (q_T - \sigma_{v0})$ och $N_m = (q_T - \sigma_{v0}) / (\sigma'_{v0} + a)$ beräknas och friktionsvinkeln ϕ' utvärderas sedan ur diagrammet i Fig. 4.4.

*) $a = c' \cot \phi'$

Fig. 4.4
Diagram för utvärdering av friktionsvinkel ur resultat från CPT-sonderingar då poröverttryck uppstått under sonderingen. (5).



Tabell 4.2
Empiriska värden
på friktionsvinkel
för silt.

Relativ fasthet	Friktionsvinkel, °
Mycket lös	26°-29°
Lös	29°-32°
Medelfast	32°-34°
Fast	34°-37°
Mycket fast	37°-39°

Jordens *sättningsmodul* utvärderas ur uppmätt totalt spetstryck vid sonderingen som $E = 4,3qT^{0,93} \leq 90$ MPa. Denna modul motsvarar de empiriska karakteristiska värden som erfarenhetsmässigt kan användas vid sätt-

ningsberäkning under plattor och belastningar på marken tillsammans med vertikala spänningsökningar beräknade med elasticitetsteori.

4.3.2 Hejarsondering

Hejarsondering utförs då CPT-sonden inte kan drivas ner till erforderligt djup. Sonderingen utförs enligt HfA-metoden med mätning av mantelfriktionen mot sondstängerna. Relativ fasthet, friktionsvinklar och moduler utvärderas ur N_{20} ($HfA_{(metto)}$) enligt Plattgrundläggningshandboken och Vägverkets rekommendationer. De tabellerade riktlinjerna för kompressionsmodulen kan skrivas som $E \approx 2,8 N_{20}^{0,91} \leq 90$ MPa.

4.4 Vingförsök

Vingförsök kan vid behov utföras i de delar av jordprofilen som består av lera, eller som ändå är så finkorniga att man med ledning av jordartsklassificering och resultat från CPT-sondering bedömt att vingförsök kan ge användbara resultat. Försöken utförs enligt av SGF rekommenderat standardförfarande (9). I växellagrad lera/silt rekommenderas att vinge med skyddskåpa används. Också i detta fall blir störningen vid vingens installation ofta påtaglig. Utvärderingen av den odränerade skjuvhållfastheten är starkt beroende av jordens flytgräns och i varvig och växellagrad silt/lera är det svårt att bestämma ett rättvisande värde på denna. Bestämningen av odränerad skjuvhållfasthet blir därför relativt osäker i sådan jord.

4.5 Dilatometerförsök

Huvudsyftet med dilatometerförsök är att få en noggrann bestämning av jordens sättnings-egenskaper. Försöken utförs enligt av SGF rekommenderat standardförfarande (10). Vid försök i silt är det speciellt viktigt att det angivna förfarandet och tidsschemat för försöken följs. Tolkning och utvärdering av försöken är närmare beskrivet i SGI Information Nr 10 (11). Den görs normalt med hjälp av ett datorprogram, t.ex. SWEDILL. Endast speciella och delvis nya aspekter när det gäller silt anges här.

Vid tolkning av dilatometerförsök ingår rådande portryck och effektiv vertikalspänning in-situ bland de basparametrar som erfordras. Den rådande portryckssituationen med såväl de positiva som negativa trycken måste därför vara känd. Försöksresultaten ger sedan möjlighet till en relativt god klassificering av jorden på försöksnivåerna och därmed kan en uppskattning av dess tunghet göras. Portrycken måste dock mätas separat.

Vid installation av dilatometern sker alltid en viss störning och normal störning är inbegripen i den i huvudsak empiriska utvärderingen. I växellagrad lera/silt och varvig siltig lera/lerig silt blir störningen ofta ovanligt kraftig, vilket kan resultera i att de utvärderade resultaten i form av skjuvhållfasthet och speciellt sättningsmodul blir för låga (8). De nivåer där detta är påtagligt kan normalt sorteras ut eftersom detta avspeglas i att låga materialindex, $I_{D(Korr)}$, och överkonsolideringsgrader, OCR , utvärderas. I de fall $I_{D(Korr)}$ blir $\leq 0,13$ och OCR samtidigt erhåller ett markant lägre värde än vad som kan anses sannolikt med ledning av övriga bestämningar i profilen, kan provningen på nivån antas ha blivit utförd i alltför störd jord.

Moduler från dilatometerförsök är relevanta för sand, silt och överkonsoliderad lera. I partier med normalkonsoliderad lera och lerig silt skall dilatometerförsöken kompletteras med ostörd provtagning och ödometerförsök. Vilka dessa partier är framgår klart ur resultaten från dilatometerförsöken.

I skikt med överkonsoliderad lera/silt där störningen varit stor kan ett försiktigt värde på sättningsmodulen uppskattas på det sätt som tidigare rekommenderats för överkonsoliderad lera. Detta görs ur de utvärderade värdena på $I_{D(Korr)}$, och odränerad skjuvhållfasthet, τ_{fu} .

$$E \approx 250 \tau_{fu} \quad \text{för lera} \quad (I_{D(Korr)} < 0,35)$$

$$500 \tau_{fu} \quad \text{för siltig lera} \quad (0,35 \leq I_{D(Korr)} < 0,6)$$

$$1000 \tau_{fu} \quad \text{för lerig silt} \quad (I_{D(Korr)} \geq 0,6)$$

Vid kraftig störning blir värdena på såväl $I_{D(Korr)}$, som τ_{fu} också för låga varför den på detta vis uppskattade modulen blir på säkra sidan. Denna utvärdering ger dock betydligt mer realistiska värden i kraftigt störda skikt.

4.6 Pressometerförsök

Resultaten av pressometerförsök är starkt beroende av operatören och försöken bör normalt utföras av specialister. Bland annat är det svårt att erhålla den kvalitet på de förborrade hålen som fordras. I silt är detta speciellt svårt under den fria grundvattenytan, även för erfarna specialister.

I silt ovanför den fria grundvattenytan är det ofta relativt lätt att skapa undersökningshål av god kvalitet då dessa står öppna och stabiliseras av de negativa portrycken. Resultaten av försöken är dock starkt beroende av dessa negativa portryck. Egenskaper och främst bärlighet kan därför bli kraftigt överskattade i förhållande till situationer med högre grundvattenstånd och lägre eller helt utjämnade negativa portryck och någon etablerad metod för att korrigera resultaten för olika grundvattenförhållanden finns inte.

Vanliga pressometerförsök har därför en mycket begränsad användning i silt.

4.7 Portrycksmätning

4.7.1 Mätning av positiva portryck i fält

Mätning av positiva portryck i silt görs med utrustningar som är avsedda för mätning i finkornig jord. En sammanställning över olika mätsystem, hur och var portrycksmätarna bör placeras samt hur dessa mätningarna går till

Pressometerförsök har en mycket begränsad användning i silt.

finns beskrivet i SGI Information 11 (12). Mätning av positiva portryck i genomsläppliga lager under grundvattenytan kan också göras genom mätning av utjämnade portryck efter stopp i CPT-sonderingar.

4.7.2 Mätning av negativa porvattentryck i fält.

Utrustning och metod

För mätning av negativa portryck i fält finns ett antal olika utrustningar (13, 14). Den utrustning som normalt används i Sverige är portrycksmätare typ BAT. Denna mätare har ett slutet system, se Fig. 4.5, och består av en portrycksspets, en mätkropp med tryckgivare och en avläsningsenhet. Portrycksspetsen har ett rörformigt filter som omsluter en kammare, som upptill är tätad med dubbla gummimembran.

Vid mätning av negativa portryck används ett speciellt keramiskt "no-air-entry" filter som inte släpper igenom luft (15). Helst bör ett filter som är försedd med speciella tätningar i ändytorna användas. Själva spetsen kan vara av plast eller stål beroende på jordens fasthet och korrosivitet. Det keramiska filtrets diameter får inte vara mindre än spetsens, utan måste vara minst densamma för att fullgod kontakt med jorden skall uppnås. Före installationen måste hela spetsen, inklusive filtret, mättas noggrant med avluftat vatten.

Det keramiska filtret torkas först i ugn vid 105 °C under ett dygn. Filtret placeras därefter på ett galler ovan vattenytan i en vakuum-

behållare och sätts under vakuum under ca 1 timme, se Fig. 4.6. Därefter sänks filtret ned i vattnet och "vakuunkokas" i ytterligare några timmar vid rumstemperatur. Detta görs för att förhindra att luft som är instängd i porerna skall lösa sig i vattnet och med tiden bilda en luftkudde inne i spetsens kammare och därigenom åstadkomma felaktiga mätvärden.

Montering av filtret görs sedan under vatten, vilket också skall vara avluftat. Spetsen förbinds med markytan med galvaniserade 1"-rör, där det galvaniserade övergångsröret mellan spets och 1"-rör skall vara minst 0,5 meter långt. Gångorna på 1"-rören skall tätas med tätningsmedel, t ex permatex, om rören inte skarvas med presspassning. Inläckande vatten kan föra med sig jordpartiklar som kan lägga sig på spetsens membran och vid mätning förhindra att mätkroppens nål kan penetrera membranet eller sätta igen nålen. Av samma orsak är det viktigt att rören är väl rengjorda inuti.

Portrycksspetsen installeras i ett förborrat hål i jorden. Förborringen utförs lämpligen med en vriden spets med en diameter som är något större än muffarna på de galvaniserade rören t.ex. en drejetrycksondspets. Förborring som innebär att jorden packas på spetsnivån, t.ex. jordbergsondering, slagsondering etc, är olämplig. Spetsen skall tryckas ner ca 0,5 meter i ostörd jord, dvs en halvmeter djupare än det förborrade hålet. Anledningen till detta är dels att säkerställa mätning i naturlig jord på installationsnivån, dels att erhålla god kontakt mellan filter och jord, för att erhålla relevanta mätvärden.

Neddrivningen av spetsen måste utföras med största försiktighet, då det keramiska filtret är mycket känsligt för stora belastningar, stötar och slag. Vid neddrivningen kan det därför vara lämpligt att ha mätenheten inkopplad så att det är möjligt att se om negativa mätvärden registreras.

Slutligen tätas området närmast kring 1"-röret med cement, bentonit eller en blandning av dessa. Detta görs för att förhindra att

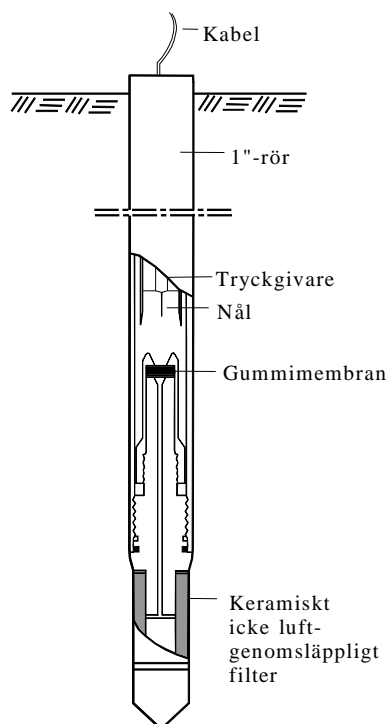
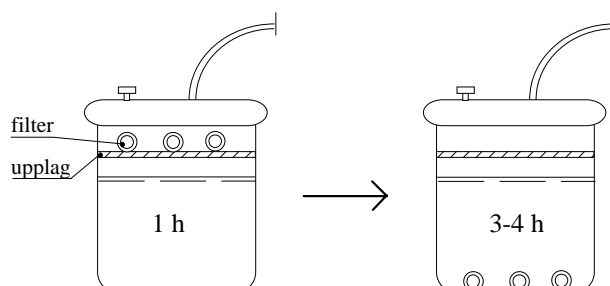


Fig. 4.6
Portrycksspets typ BAT och vakuumbehandling av filter.



regnvatten eller vatten från ovanliggande vattenförande skikt rinner ner längs rören till jorden vid spetsen, vilket skulle medföra felaktiga mätvärden. Det är också viktigt att ett lock sätts på rörets topp för att förhindra att smuts och vatten kommer ner i röret.

Mätning av negativa portryck görs på samma sätt som vanliga portrycksmätningar med den skillnaden att mätvärdet blir negativt. I sand- och siltjordar kommer systemet i jämvikt med omgivande jord nästan omedelbart, varför mätningarna kan påbörjas strax efter installationen. Vid mätningen sänks mätkroppen ned i förlängningsrören och dess nål penetrerar gummimembranen. Jämvikt mellan vattenstrycken i jorden och i tryckmätaren inträder nästan omgående och mätvärdet registreras med avläsningsenheten på markytan. Mätkroppen lyfts sedan upp en liten bit så att den frigörs från spetsen och en referensavläsning görs. På detta vis korrigeras det avlästa värdet för eventuella effekter av temperatur och lufttrycksförändringar.

Portrycksspetsar för mätning av positiva och negativa porvattenstryck bör installeras med hänsyn till problemställningen och mätningens syfte. Resultat från CPT-sonderingar och provtagningar bör ligga till grund för val av installationsnivåer. Spetsar bör installeras i olika skiktgränser där portrycksprofilen kan ändras, t.ex. vid grundvattenytan, i eventuella vattenförande skikt etc och om möjligt också i den intermediära zonen.

■ Vanliga problem vid mätning av negativa portryck

Ett vanligt problem vid mätning av negativa portryck är att man genomgående, eller efter en tid, registrerar värden nära noll. Den vanligaste orsaken är att man inte kan registrera portrycket i jorden på grund av otillräcklig kontakt mellan filtret och jorden. En noggrann installation minimerar detta problem.

I de fall stora negativa portryck har uppmätts direkt efter installationen, börjar dessa ofta att minska efter någon eller några veckor och värdena närmar sig noll. Detta sker främst i spetsar som installerats i markvattenzonen och den intermediära zonen. Anledningen till detta förmodas vara att luft, och annan gas som är löst i porvattnet, diffunderar in i portrycksspetsens kammare. Inuti

kammaren går luften ur lösning och ackumuleras. Detta medför att det negativa trycket utjämnas och närmar sig atmosfärstrycket. Denna process pågår ständigt, speciellt i de zoner där det finns en stor andel luft i porerna. För att mätningar av porvattenstryck skall kunna göras under längre tid måste portrycksspetsarna därför avluftas regelbundet och fyllas på med avluftat vatten. Spetsar i den kapillära zonen, där vattenmättnadsgraden är hög, bibehåller normalt de negativa trycken under en betydligt längre tid.

■ Årstidsvariationer

De negativa portrycken i den intermediära zonen påverkas normalt endast i begränsad grad av nederbörd och måttliga fluktuationer hos grundvattenytan. I den omättade jorden i denna zon är dessutom en tryckförändring kopplad till en förändring i vattenmättnadsgraden och det effektiva negativa portrycket, $u_{eff} = S_r \cdot u_w$, förblir därmed nästan konstant, (se avsnitt 2.4.2). För de flesta ändamål räcker det därför att mäta de negativa portrycken på olika nivåer i de omättade zonerna samt att bestämma tillhörande vattenmättnadsgrader på prover som tagits vid samma tillfälle.

Vid kraftiga fluktuationer i grundvattenytan ändras de olika zonernas utbredning i jordprofilen och därmed påverkas de negativa trycken i såväl den kapillära zonen som den intermediära zonen undre del (16). De negativa trycken i dessa partier minskar eller ökar beroende på om grundvattenytan stiger eller sjunker. I den kapillära zonen är portrycken i princip omvänt hydrostatiska och varierar i storlek och takt med grundvattenytans nivåförändring, se Fig. 4.7.

Ett vanligt problem vid mätning av negativa portryck är att man registrerar värden nära noll.

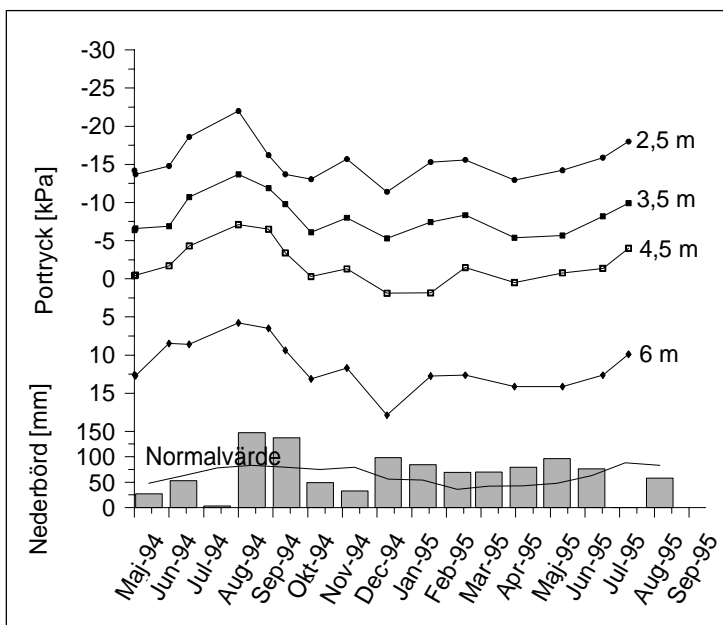


Fig. 4.7
Exempel på årstidsvariation hos negativa portryck i en profil med en grundvattenyta på cirka 5 m djup.

4.8 Provtagning

4.8.1 Ostörd provtagning

Ostörd provtagning utförs med standardkolvprovtagare typ St I eller St II. I båda fallen krävs normalt användning av slutarbleck vid provtagning i siltig jord. Provtagningen skall göras med stor varsamhet och enligt SGI:s (17) och SGF:s (18) rekommendationer med speciell varsamhet under uppdragning och provhantering. Prover med löst lagrad silt kräver extremt försiktig uppdragning och behandling samt specialtransport till laboratorium. (Också övriga prover i siltiga jordar skall behandlas och transporteras med stor varsamhet).

Provtagare St II bör användas i siltjordar eftersom den medger en jämnare utstansningshastighet och risken för att utrustningen skall kärva och rycka är mindre. I vissa lagerföljder med omväxlande lös och fast jord kan dock problem uppstå eftersom provtagaren vid utlösningen fixeras i den kringliggande jorden genom sidofriktion och vidhäftning. Vid övergångar där provtagaren är fixerad i ett löst lager och där tagdonet skall stansas in i ett fast underliggande lager är risken stor att provtagaren i stället roteras loss. Samtidigt medför överliggande fasta lager att de extravingar som kan användas för att förbättra fixeringen i lös jord inte kan användas på grund av för stort neddrivningsmotstånd. Val av provtagare kan göras med ledning av sonderingsresultaten.

”Helt ostörd” provtagning kan inte utföras i ren silt. Om man är tillräcklig varsam är det dock normalt möjligt att erhålla prover som bibehållit tillräckligt av sin struktur för att hållfasthets- och kompressionsegenskaper skall kunna undersökas i laboratoriet.

4.8.2 Störd provtagning

Störd provtagning kan utföras med standardkolvprovtagare eller skruvprovtagare. Vid kolvprovtagning bibehålls jordens lagerföljder och skiktning i detalj också i de fall den i övrigt blir påtagligt störd. Vid skruvprovtagning sker däremot en betydande omrörning och det kan då bli svårt att urskilja varvighet och tunnare skikt. Vilken typ av provtagning som fordras för att en tillräckligt god bild av jorden inom olika partier av profilen skall erhållas kan bedömas ur resultaten från CPT-sonderingen. Kurvorna för spetstryck och portryck från denna sondering indikerar hur homogena de olika jordlagren är.

*”Helt ostörd”
provtagning
kan inte
utföras i
ren silt.*

Att läsa vidare:

- (1) **Larsson, R. & Mulabdic, M. (1991).** Shear Moduli in Scandinavian Clays. Statens geotekniska institut, Rapport Nr. 40, Linköping.
- (2) **Larsson, R. (1992).** CPT-sondering - En in-situ metod för bestämning av jordlagerföljd och egenskaper i jord. Statens geotekniska institut, Information Nr. 15, Linköping.
- (3) **Svenska Geotekniska Föreningen (1993).** Rekommenderad standard för CPT-sondering. SGF Rapport 1:93.
- (4) **Marchetti, S. (1985).** On the Field Determination of K_0 in Sand. Panel Discussion. 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco, Session 2A.
- (5) **Senneset, K. & Janbu, N. (1984).** Shear Strength Parameters obtained from Static Cone Penetration Tests. ASTM Special Technical Publication, STP 883.
- (6) **Bergdahl, U., Ottosson, E. & Malmberg, B. S. (1993).** Plattgrundläggning. Svensk Byggtjänst, Solna.
- (7) **Vägverket (1994).** Jords hållfasthets- och deformationsegenskaper. VV publikation 1994:15, Borlänge.
- (8) **Larsson, R. (1997).** Investigations and load tests in silty soils - Results from a series of investigations in silty soils in Sweden. Statens geotekniska institut, Rapport Nr. 54, Linköping.
- (9) **Svenska Geotekniska Föreningen (1993).** Rekommenderad standard för vingförsök i fält. SGF Rapport 2:93.
- (10) **Svenska Geotekniska Föreningen (1995).** Rekommenderad standard för dilatometerförsök. SGF Rapport 1:95.
- (11) **Larsson, R. (1990).** Dilatometerförsök - En in-situ metod för bestämning av jordlagerföljd och egenskaper i jord. Statens geotekniska institut, Information Nr. 10, Linköping.
- (12) **Tremblay, M. (1990).** Mätning av grundvattennivå och portryck. Statens geotekniska institut, Information Nr. 11. Linköping.
- (13) **Fredlund, D.G. & Rahardjo, H. (1993).** Soil Mechanics for Unsaturated Soils. Wiley and Sons, New York.
- (14) **Tremblay, M. (1995).** Modelling of groundwater conditions in silts and fine sands - A study of induced groundwater changes based on laboratory and full-scale field tests. Avhandling, Chalmers Tekniska Högskola, Inst. för Geoteknik, Göteborg. Också som Statens geotekniska institut, Rapport Nr. 50, Linköping.
- (15) **Forsgren, I. & Öberg, A.-L. (1997).** Mätning av negativa portryck i silt och sand. Chalmers tekniska högskola, Institutionen för geoteknik, Rapport B 1997:1.
- (16) **Öberg, A. L. (1995).** Negative Pore Pressures - Seasonal Variations and Importance in Slope Stability Analysis. Proceedings, 1st International Conference on Unsaturated Soils, UNSAT'95, Paris, Vol. 2, pp- 907-913.
- (17) **Kallstenius, T. & Hallén, A. (1963).** Anvisningar för Geotekniska institutets fältundersökningar, Del 2: Provtagning med standardkolvborr ST I. Statens geotekniska institut, Meddelanden Nr. 6, Stockholm.
- (18) **Svenska Geotekniska Föreningen (1996).** Geoteknisk fälthandbok; Allmänna råd och metodbeskrivningar, SGF Rapport 2:93.

5. Laboratorieprovning

En hög silthalt medför speciella problem

Arbetsgång vid provning av silt:

- Undersök proverna okulärt
- Bedöm störning och lämpliga provningsmetoder
- Utför tillämpliga rutinundersökningar i representativa delprover
- Utför specialförsök efter behov

5.1 Allmänt

För laboratorieundersökningar av silt används normalt samma utrustningar som för lera. Här medför en hög silthalt speciella problem med t.ex. friktion, dålig anliggning och egendeformationer i utrustningen vid ödometerförsök, tolkning av speciellt dränerade direkta skjuvförsök och fallkonförsök samt bestämning av konsistensgränser. Jordens skiktning och varvighet skapar också ofta problem vid provning och vid uttolkning av rättvisande egenskaper.

Direkta skjuvförsök och triaxialförsök i laboratoriet är de enda normalt tillgängliga försökstyper där silt kan provas under fullständigt odränerade förhållanden. Giltigheten av resultat från helt odränerade, respektive helt dränerade, laboratieförsök för fältförhållanden är svår att generalisera och får i de enskilda fallen bedömas utifrån jordlagerföljd, grundvattenförhållanden och lastfall.



Frågeställningar vid laboratorieundersökningar.

5.2 Arbetsgång

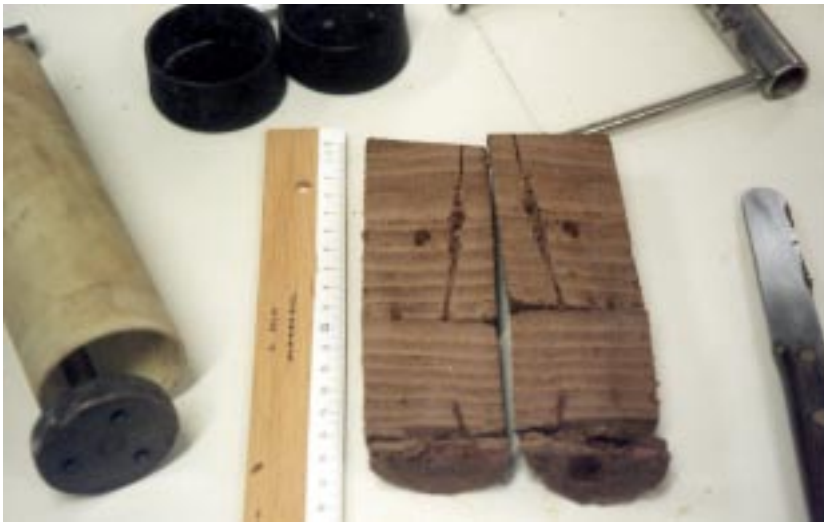
Laboratorieprovning av siltprover börjar med klassificering. Beroende på jordart, homogenitet och störningsgrad utförs därefter olika försök.

Prover som tagits med skruvprovtagare eller annat redskap, är som regel så omrörda att detaljer i uppbyggnaden, som skiktningar, varv och liknande förlorats. I mycket homogen jord kan detta vara av underordnad betydelse, men i skiktade jordar, *Fig. 5.1*, får man vid laboratorieprovningen endast medelvärden som inte är helt representativa för jordmassans egenskaper. Om det är möjligt, bör skikt med uppenbart olika material åtskiljas. Den relativa mängden av de olika materialen och skiktens tjocklekar noteras då och jämförs med fältprotokollen från provtagningen och de olika materialtyperna klassificeras och provas sedan var för sig.

Prover som tagits med kolvprovtagare och transporterats i provhylsor vägs först för bestämning av tunghet. Proverna i överburkarna besiktigas okulärt. Påtaglig störning i form av att jorden packats visar sig ofta i form av fritt vatten i provets överyta och stor sidofriktion vid provtagning visar sig ofta i krökta skikt vid provtubsväggarna. Detta noteras speciellt. Skikt med uppenbart olika material separeras. Den relativa mängden av de olika materialen och skiktens tjocklekar noteras. De olika materialtyperna undersöks och provas sedan var för sig.

Med ledning av den inledande besiktningen och klassificeringen, provernas störningsgrad och den aktuella problemställningen väljs sedan lämpliga provningsmetoder.

Bestämningar av *kornfördelning*, *kompakt-densitet*, *mineralsammansättning*, *konsistensgränser*, *kapillaritet*, och *vattenbindningsförmåga* kan göras på störda prover, under förutsättning att de är representativa. Vid provning av permeabilitet skall man betänka att i skiktad jord är den horisontella permeabiliteten för jordmassan som helhet ofta mycket högre än den vertikala. Bestämningen av permeabilitet är känslig för jordens struktur och packningsgrad och utförs helst på "ostörda" prover. Bestämning av en representativ vattenkvot for-



Vid laboratorieprovningen fås endast medelvärden som inte är helt representativa för jordmassans egenskaper.

drar att provet behållit sitt vatten under provtagning och transport. Vid stark störning av skiktad jord finns risk för vattenvandring mellan de olika skikten och att de uppmätta vattenkvoterna inte blir representativa för fältförhållandena.

Provning av *odränerad skjuvhållfasthet* kan utföras på "ostörda" prover. I homogen siltjord bör triaxialförsök utföras. I homogena partier med lerig jord och inbäddade lerskikt utförs fallkonförsök. Resultaten av dessa försök är dock mycket känsliga för störning och i mycket lågplastisk jord blir korrektionen för flytgränsen dessutom osäker. I skiktad jord måste man för varje försök kontrollera att den påverkade jordvolymen består av homogen jord utan innehåll av siltskikt. Vid mycket täta skikt och varv bestäms den odränerade skjuvhållfastheten med direkta skjuvförsök. I denna typ av jord kan fallkonförsök inte användas.

Bestämning av *dränerad skjuvhållfasthet* i varvig jord med lera och siltskikt utförs på "ostörda" prover med direkta skjuvförsök. Försöket kan också användas för homogen lerig jord. För ren siltjord används triaxialförsök.

Provning av jordens *kompessionsegenskaper* utförs normalt endast på "ostörda" prover från normalkonsoliderade eller endast svagt överkonsoliderade leriga lager och skikt i jordprofilen. Dessa försök utgör komplement till fältundersökningarna i de partier där relevanta värden är svåra att få i fält. De utförs som ödometerförsök med ordinarie provningsutrustning för lera. Vid provningen kontrolleras att delprovet i ödometern helt, eller i största möjliga grad, består av homogen lerig jord. Vid varvig eller starkt skiktad jord skall resultaten relateras till hur stor del av jorden på den aktuella nivån som ödometerprovet representerar.



Fig. 5.1
Exempel på varviga och skiktade siltjordar.
a) varvig silt,
b) varvig lerig silt/siltig lera/silt.

Provning av inpackade siltprover kan bli aktuell i de fall egenskaperna i planerade fyllningar av silt skall undersökas i förväg. Provningarna bör då utföras i triaxialapparat respektive s.k. Rowe-ödometer på prover som fyllts och packats in på motsvarande sätt som man planerar att använda i fält.

5.3 Klassificering

Klassificering av svenska siltjordar görs enligt SGF:s laboratoriekommittés anvisningar (1). För mineraljord baseras dessa helt på jordens kornstorleksfördelning. Gränsen mellan att jord skall uppträda som lera eller silt beror dock till stor del på mineralsammansättningen i de ingående partiklarna och denna klassificering gäller därför endast jord med för svenska förhållanden normal sammansättning. Annan jord, som till exempel innehåller s k högaktiva lermineral kan ha geotekniska egenskaper som en lera trots att den med avseende på halten lerpartiklar inte skulle klassificeras så enligt det svenska systemet.

Vid en preliminär klassificering av jorden används olika skakförsök, utrullningsförsök samt bryt- och tryckförsök.

I andra länder används ofta system som bygger på jordens konsistensgränser, (t ex 2). Dessa är behäftade med andra felkällor. De bygger dessutom på bestämmningar som är användar- och apparatberoende och har framtagits med laboratoriemetoder som kan skilja sig påtagligt från de som används i Sverige.

Ovanstående problem är en av många anledningar till att det hittills varit svårt att skapa ett enhetligt internationellt klassificeringssystem.

Vid en preliminär klassificering av jorden med hänsyn till dess uppträdande används enligt de svenska anvisningarna olika skakförsök, utrullningsförsök samt bryt- och tryckförsök, Fig 5.2. I Europanormen "Geotechnical design assisted by laboratory testing" (3) hänvisas till det danska klassificeringssystemet, som i stort bygger på samma principer (4). För klassificering av jord i gränzonen mellan lera och silt, och speciellt jord med annat ursprung och/eller sammansättning än den som är vanlig i Sverige, rekommenderas därför att större tonvikt läggs på jordens uppträdande vid denna typ av försök.

5.4 Rutinundersökning

Rutinundersökningar av tunghet, kornfördelning, korndensitet, vattenkvot och konsistensgränser utförs enligt svensk standard för geotekniska laboratorieundersökningar (5).

Tunghet mäts på kolvprover genom vägning av hela provhylsan inklusive eventuellt fritt vatten. Om det finns tjocka skikt med påtagligt olika sammansättningar, kan provet eventuellt sedan delas upp och densiteten för de olika delskikten bestämmas var för sig. Det senare gäller dock inte om det finns fritt vatten i provhylsan. Andra förfaranden, som t.ex. fyllning eller inpackning av störda prover innebär stora osäkerheter.

Kornfördelning kan bestämmas på alla typer av representativa prover. För silt används främst sedimentationsförsök, eventuellt i kombination med siktning. Kornfördelningen i silt används indirekt för bedömning av en rad egenskaper och faktorer som vattenbindningsförmåga, packbarhet med djuppackning, permeabilitet, lämplighet som fyllnadsmaterial, metod för grundvattensänkning etc.

Korndensitet kan bestämmas på alla typer av prover. Vid skiktad jord kan bestämmningar göras för de separata skikten. Normalt görs dock inte denna bestämning för rutinändamål, utan vid behov använder man oftast schablonvärden av 2,65-2,70 Mg/m³ för silt och grövre jord respektive 2,70-2,80 Mg/m³ för lera.

Vattenkvot och **vattenmättnadsgrad** mäts på kolvprover. Vid förekomst av fritt vatten vid

provets överyta skall detta inräknas. Ostörda skiktade prover kan sedan delas upp och vattenkvoten bestämmas separat för de olika skikten. Det senare är inte meningsfullt om fritt vatten förekommer. Andra bestämmningar, t.ex. på omrörda prover och prover som transporterats i plastpåsar är oftast mer eller mindre missvisande.

Konsistensgränserna bestäms främst i skikt och lager av lera samt i lerig silt. I ren silt är konsistensgränserna normalt inte av intresse. Vid bestämning av konflytgränsen i siltig jord skall reglerna för avläsning vid eventuell eftersjunkning hos konen observeras. Utrullningsgränsen bestäms normalt inte i Sverige.

Mineralsammansättningen i silt bestäms normalt inte. Egenskaperna i de ingående lermineralen kan klassificeras i form av aktivitetstalet a_c med hjälp av uppmätta konsistensgränser och lerhalt, $a_c = I_p/l_c$, där I_p är plasticitetsindex och l_c är lerhalt.

Bestämning av mineralsammansättningen kan vid behov göras med röntgendiffraktionssanalys.

5.5 Bestämning av vattenförande och vattenhållande egenskaper

5.5.1 Permeabilitet

Permeabiliteten i siltjord kan grovt uppskattas med ledning av jordens kornfördelning. Permeabiliteten är beroende av lagringstätheten och vattenmättnadsgraden, och en noggrannare bestämning görs därför helst på ostörda prover i en apparatur där full vattenmättnad kan tillförsäkras. En sådan bestämning görs lämpligen i triaxialapparat eller liknande permeabilitetscell. Inpackade prover kan också användas, men detta medför vissa felkällor eftersom jordens struktur inte helt kan återskapas.

I permeabilitetsförsök mäts normalt ett medelvärde av den vertikala permeabiliteten i provet. I skiktad jord kan dock huvuddelen av vattenströmningen i naturen ske i horisontal led. För att få relevanta värden för beräkning av den horisontella permeabiliteten måste separata försök utföras på materialen i de olika skikten och kopplas till tjockleken hos dessa. Detta gäller främst skikt med grövre material. I skikt med vattenmättad lera, och i vissa fall lerig silt, kan permeabiliteten bestämmas på ett rationellare sätt genom CRS-försök i ödometrar.

Skakförsök (dilatansförsök).

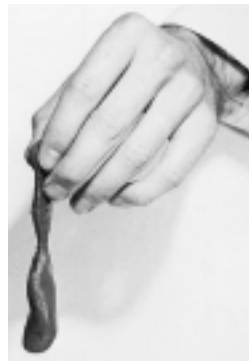
Efter skakning. Silt flyter ut och ytan blir våt och blank. Detta ske snabbare ju grövre silten är.
(Provet består av grovsilt.)



Efter hoptryckning. I silt sugts vattnet in i provet och provytan blir matt.
(Provet består av grovsilt.)



Skakförsök (slamprov) efter skakning.
Silt flyter ut och bildar slamsor. Detta sker snabbare ju grövre silten är.
(Provet består av lerig silt.)



Utrullningsprov.

Silt bryts sönder när tråden blir för tunn. Detta sker tidigare ju grövre silten är. För grovsilt sker detta vid en diameter > 4 mm och för mellansilt, finsilt och lerig silt vid diametrar mellan 2 och 4 mm. (Provet består av lera.)



Brytprov på torkat prov.

Silt bryts lätt sönder – ju grövre silt desto lättare bryts den. (Provet består av silt.)



Tryckprov på torkat prov.

Silt trycks lätt sönder – ju grövre silt desto lättare trycks den sönder. I grovsilt kan sedan de enskilda kornen kännas mellan fingrarna, medan finsilt känns lent. (Provet består av silt.)

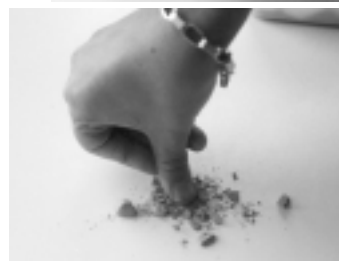


Fig. 5.2
Enkla hjälpförsök vid klassificering av jord i gränssonen mellan silt och lera. (1)

Övertryckskapillarimetern, klarar ett tryck av minst 10 m vattenpelare, vilket ungefär motsvarar intervallet för siltjord.

5.5.2 Kapillaritet

Kapillariteten kan grovt uppskattas med ledning av jordens kornfördelning. Den kan också mätas med kapillarimetrar, där man mäter det tryck som fordras för att vattnet i ett vattenmättat prov skall tryckas ut och ersättas av luft. Det värde som då mäts är den undre kapillära stighöjden vid sjunkning (dränering). Den hittills vanligaste apparaten, Beskows undertryckskapillarimeter, har främst använts för klassificering av jorden ur tjälfarlighets-synpunkt enligt äldre kriterier. Den tillåter ett maximalt tryck av 2,5 m vattenpelare, vilket normalt inte är tillräckligt för att mäta den verkliga kapillariteten i silt. En motsvarighet är övertryckskapillarimetern, där provets översida utsätts för ett ökande lufttryck. En enkel modell av denna apparat, som klarar ett tryck av minst 10 m vattenpelare, vilket ungefär motsvarar intervallet för siltjord, visas i Fig. 5.3.



Fig. 5.3
Övertryckskapillarimeter med tryckregleringsutrustning och våg för mätning av utpressad vattenmängd.

5.5.3 Vattenbindningsförmåga

Vattenbindningsförmågan i jord är dess förmåga att behålla vatten vid sjunkande grundvattenyta och/eller ökande negativa portryck samt dess förmåga att åter suga upp vatten då grundvattenytan stiger och/eller de negativa trycken sjunker. Detta uttrycks med vattenbindningskurvor, (pF -kurvor), där vattenmättnadsgraden plottas mot det negativa portrycket vid dränering respektive stigning, Fig. 5.4.

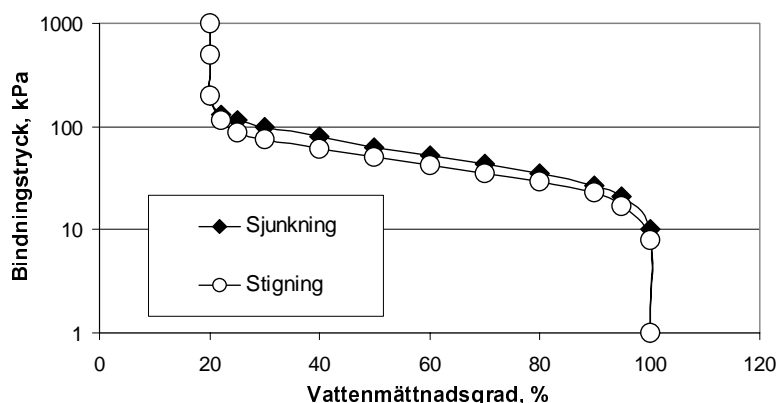


Fig. 5.4
Vattenbindningskurva.

Övertryckskapillarimetern kan kombineras med mätning av utpressad vattenmängd och man får då en relativt enkel apparat för bestämning av jordens vattenbindningsförmåga vid dränering. Vattenbindningsförmågan kan bestämmas bättre genom användande av en s.k. pF -apparat, eller med annan apparatur som utvecklats speciellt för geotekniska frågeställningar (6).

För överslagsberäkningar uppskattas vattenbindningsförmåga och negativa portryck oftast indirekt ur erfarenhetsvärden med ledning av jordens kornfördelning och vattenmättnadsgrad. Detta och noggrannare bestämmningar av negativa portryck beskrivs närmare i Kapitel 2.

5.6 Odränerad skjuvhållfasthet

Odränerad skjuvhållfasthet bestäms normalt endast i skikt och lager med lera och lerig silt. För speciella lastfall, som t.ex. vibrationer samt cykliska och dynamiska belastningar, kan den också behöva bestämmas för ren silt.

I ostörda prover med lera bestäms skjuvhållfastheten rutinmässigt med *fallkonförsök*, som utförs enligt svensk standard. Resultaten korrigeras med ledning av jordens flytgräns, men denna korrektion blir osäker för mycket lågplastisk jord, dvs. när jorden är mycket siltig. Fallkonförsök är känsliga för störning av provet eftersom omrörning ger för låga värden medan packning och rekonsolidering i siltig jord kan ge för höga värden. Vid fallkonprovning i skiktad och varvig jord måste man kontrollera att hela den jordvolym som inverkar på resultaten, dvs jorden till ett djup av 1,5 ggr konintrycket, består av homogen jord. Fastare siltskikt inom denna volym ger för låga intryck och för höga hållfasthetsvärden. I starkt skiktad jord och i ren silt är försöket inte användbart.

I kraftigt skiktad lera och silt samt i varvig/skiktad silt, där de inledande klassificeringstesterna visat att egenskaperna i de olika silt-skikten är mycket olika, provas den odränerade skjuvhållfastheten genom *direkta skjuvförsök* på ”ostörda prover”. Man ser då till att det delprov som provas innehåller såväl silt- som lerskikt, eller alternativt ett av de lösare skikten. Försöken utförs enligt svensk standard.

Före provningen uppskattas förkonsolideringstrycken i jordprofilen. Detta görs med ledning av uppmätt tunghet, uppmätta porvattentryck i fält, vad som är känt om jordens belastningshistoria, utförda ödometerförsök, resultat från dilatometerförsök i fält och tillgängliga empiriska korrelationer. Med empiriska korrelationer avses här normala relationer mellan förkonsolideringstryck och de skjuvhållfasthetsvärden som med olika metoder uppmäts i profilen i fält. I endast svagt överkonsoliderad jord, ($OCR \approx 1,25$), konsolideras provet för det effektiva överlagringstrycket. I mer överkonsoliderad jord konsolideras provet först för 80-85 % av förkonsolideringstrycket för att eliminera störningseffekter. Därefter lastas det av till det rådande effektiva överlagringstrycket. Konsolideringsförfarandet tar cirka ett dygn. Efter avslutad konsolidering låses provhöjden, dräneringskranarna stängs och provet skjuvas. Vid varierande störning och varierande skiktning kan det vara lämpligt att utföra dubbelförsök på vissa nivåer.

Den odränerade skjuvhållfastheten i relativt homogen silt bestäms genom *triaxialförsök* på ”ostörda” prover, vilket i detta fall betyder prover som tagits och transporterats med stor varsamhet. Försöken fordrar normalt en speciell monteringsapparat, så att provet kan tryckas direkt ur provhylsan in i en monteringshylsa med det utspända gummimembranet. Provet kan också behöva stabiliseras under monteringen genom att ett mindre undertryck skapas i porvattnet.

De spänningar och portryck som råder i fält samt förkonsolideringstrycket skall uppskattas innan monteringen påbörjas. Detta görs som för de direkta skjuvförsöken med tillägget att de horisontella spänningarna uppskattas med ledning av normalvärden för jordtryckskoefficienten, K_0 . Finns resultat från dilatometerförsök, kan dessa också ingå i bedömningen av K_0 -värdet. Efter monteringen konsolideras provet för den rådande spänningssituationen. Detta görs normalt i ett antal steg, så att en viss förutbestämd effektiv spänningsväg följs och att inte alltför stora porövertryck skapas. I endast svagt överkonsoliderad jord går man på detta vis direkt upp till de rådande spänningarna. I överkonsoliderad jord rekonsolideras

provet först till 80 à 85 % av förkonsolideringsspänningarna, varpå det avlastas till den rådande spänningssituationen. Efter att provet på detta vis konsoliderats och återanpassats till sitt ursprungliga spänningstillstånd stängs dräneringskranarna. Provingen utförs normalt på så vis att provet trycks ihop i vertikallid med en konstant hastighet, samtidigt som vertikalkraft, deformation och porvattentrycksändring mäts. Exempel på resultat redovisas i *Fig. 5.5*.

Odränerade försök i silt utförs normalt vattenmättade. De bör utföras med totalspänningar och portryck som vid försökens start motsvarar de som råder i fält. Den vanligaste metoden att åstadkomma full vattenmättnad vid triaxialförsök är att applicera ett högt s.k. backpressure i porvattnet, där såväl portryck som celltryck förhöjs lika mycket och det effektiva trycket därmed inte förändras. Denna metod är inte lämplig i silt. I odränerade försök tenderar provet oftast att dilatera, vilket medför att portrycket sjunker. Vid normala portryckssituationer medför detta att portrycket blir negativt och närmar sig vakuum. Ofta uppnås ett negativt tryck som motsvarar den kapillära stighöjden. I verkliga fall kan då luftgenombrott eller kavitation uppstå i porerna, dvs. att vattnet i det senare fallet kokar. Tryckminskningen avstannar då och brott uppstår. Vid försök med förhöjda portryck vid start kan denna relativa portrycksminskning bli mycket större innan kavitation och/eller brott uppstår, och man kan då mäta odränerade skjuvhållfastheter som inte kan påräknas i fält (7).

Försök med monoton belastning, dvs ständigt ökande last eller deformation, utförs med en så låg hastighet att de genererade portrycksändringarna hinner utjämnas inom provkroppen och att representativa portryck kan registreras. Om ingen särskild utredning gjorts, kan de utföras med samma hastighet som normalt används för lera.

Den odränerade skjuvhållfastheten vid hastiga cykliska laständringar provas också i triaxialapparat. Proverna konsolideras då på motsvarande sätt, för att sedan utsättas för en cyklisk belastning med förutbestämd frekvens, form och amplitud, vilken normalt avser att simulera ett verkligt belastningsmönster i fält.

5.7 Dränerad skjuvhållfasthet

Den dränerade hållfastheten i skiktad lera och silt, samt i varvig/skiktad silt provas på motsvarande sätt som den odränerade skjuvhållfastheten genom *direkta skjuvförsök* på ”ostörda prover”. Försöken är i princip identiska,

TRIAXIALFÖRSÖK

Siltprojekt				Datum	1997-11-07
				Dnr	1-9312-621
Borrhål	Djup	Benämning		Konsolideringsspänningar	
1	4,45 m	Silt			
Försöksdatum	Höjd	Typ av försök	Dräneringsförhållande	σ'_1	54 kPa
1996-12-09	99,9 mm	Aktivt	Odränerat	σ'_3	27 kPa
Utfört av	Diameter	Filnamn		Portryck	33 kPa
Lmo	50,1 mm	L-8F.ASC			
Anmärkning					

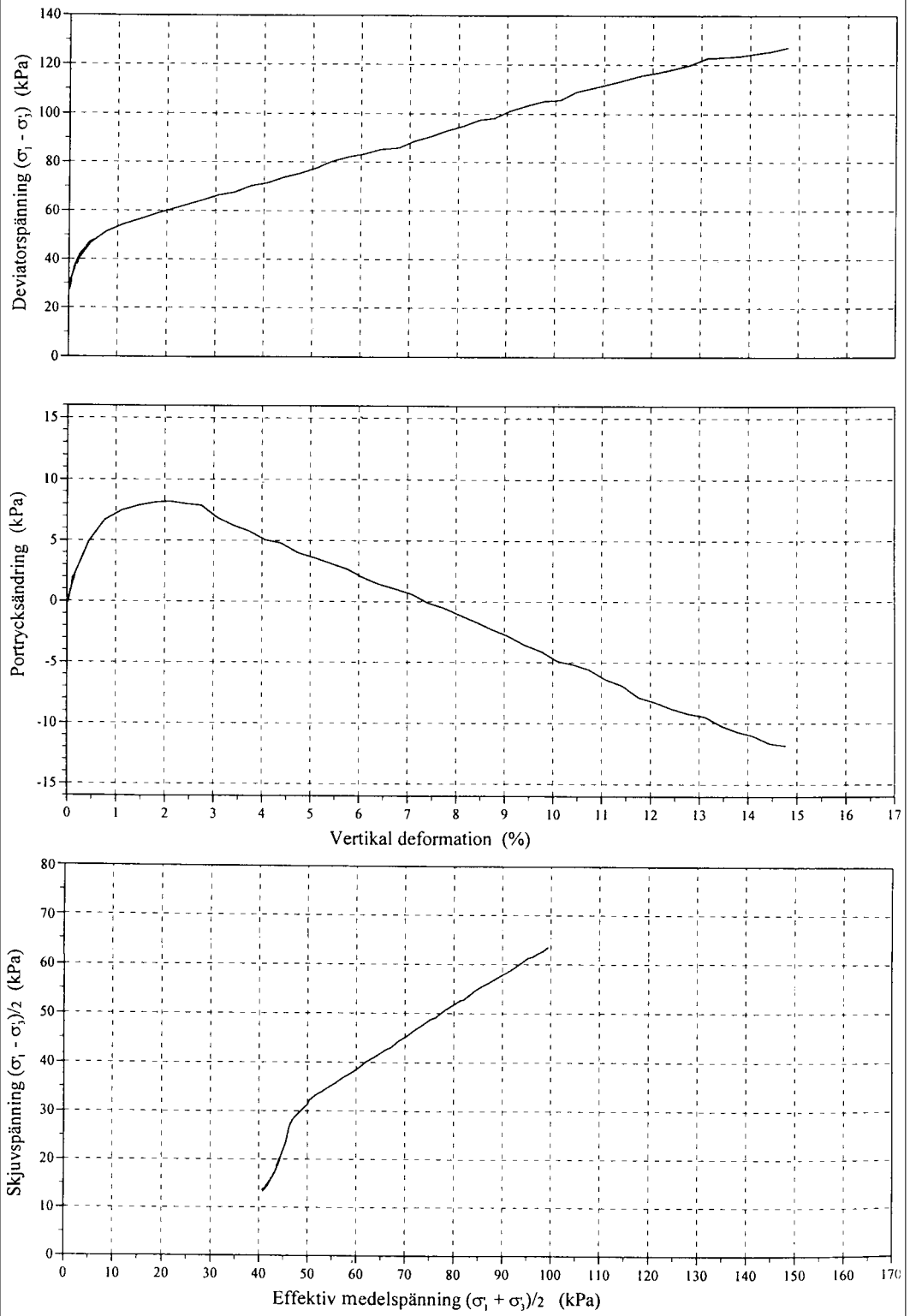


Fig. 5.5
Exempel på resultat från odränerade triaxialförsök på silt.

utom att man i de dränerade försöken låter dräneringskranarna vara öppna och i stället för att låsa provhöjden låter denna utvecklas fritt under provningen.

Den dränerade skjuvhållfastheten i relativt homogen silt bestäms på motsvarande sätt som den odränerade genom *triaxialförsök*. Montering och konsolidering sker på exakt samma sätt men provningen utförs sedan med öppna dräneringskranar och med mätning av provets volymändring. Provningsenheten kan också utföras med andra belastnings sätt för att bättre efterlikna den aktuella lastsituationen i fält. Den görs mycket långsamt, så att inga portrycksförändringar som genereras under provningen kvarstår inne i provet.

5.8 Hållfasthet i icke vattenmättad jord

Hållfastheten i icke vattenmättad jord kan provas i triaxialutrustningar där porvattentryck och porgasträck kan regleras separat. Sådana utrustningar finns ännu endast på enstaka forskningslaboratorier och provningen är komplicerad och kostnadskrävande. Hållfastheten i icke vattenmättad silt uppskattas därför normalt enligt schablonmetoder. Detta görs med ledning av uppmätta hållfasthetsparametrar i vattenmättad jord, uppmätta eller uppskattade negativa portryck och uppmätt vattenmättnadsgrad, se Kapitel 2.

5.9 Kompressionsegenskaper

Kompressionsegenskaperna i de delar av jordprofilen som innehåller normalkonsoliderad eller endast svagt överkonsoliderad lera provas genom *CRS-försök* i oedometer. Provningsenheten utförs enligt svensk standard. CRS-försök kan också bli aktuella som komplement till fältförsöken i partier med växellagrad lera och silt, där resultaten antyder att jorden blivit kraftigt störd vid fältförsöken.

CRS-försök kan också utföras på ”ostörda” prover av silt, men detta är ingen rationell metod. Provningsenheten av kompressionsegenskaperna i denna typ av jord utförs lämpligast i fält.

Provningsenheten av kompressionsegenskaper på ”ostörda” prover av såväl silt som lera kan också utföras i *triaxialapparat*. Detta görs normalt endast i de fall man skall utföra mer avancerade numeriska beräkningar, vilka kräver parametrar som endast kan bestämmas på detta vis.

En uppskattning av elasticitetsmodulen och dess variation med deformationen vid relativt stora deformationer kan fås ur ordinarie odränerade respektive dränerade triaxialförsök.

5.10 Mätning av negativa portryck

5.10.1 Utrustning

Vid mätning av negativa portryck i laboratorium används speciella celler, (8, 9, 10, 11). Till grund för dessa celler ligger en teknik som kallas ”Null Type Pressure Plate and Axis Translation Technique”, (12). Tekniken går ut på att höja lufttrycket i cellen tills porvattentrycket i det inneslutna provet blir lika med noll samtidigt som skillnaden mellan dessa båda tryck, dvs det negativa porvattentrycket, förblir konstant. Detta medför att kavitation (kokning) i mätsystemet vid stora negativa tryck kan förhindras. Utrustningen framgår av *Fig. 5.6*.

Mätcellen består av en tryckkammare i vilken jordprovet placeras. Cellens botten innehåller ett slutet vattenfyllt utrymme som står i kontakt med tryckkammaren via en vattenmättad icke-luftgenomsläpplig keramisk filtersten. Tryckkammaren och det vattenfyllda utrymmet under filterstenen står i kontakt med var sin tryckgivare. Dessa är kopplade till en dator för kontinuerlig registrering av mätvärden. Tryckkammaren står också i kontakt med ett tryckluftsystem med manometer och en regulator, med vars hjälp lufttrycket i kammaren kan regleras.

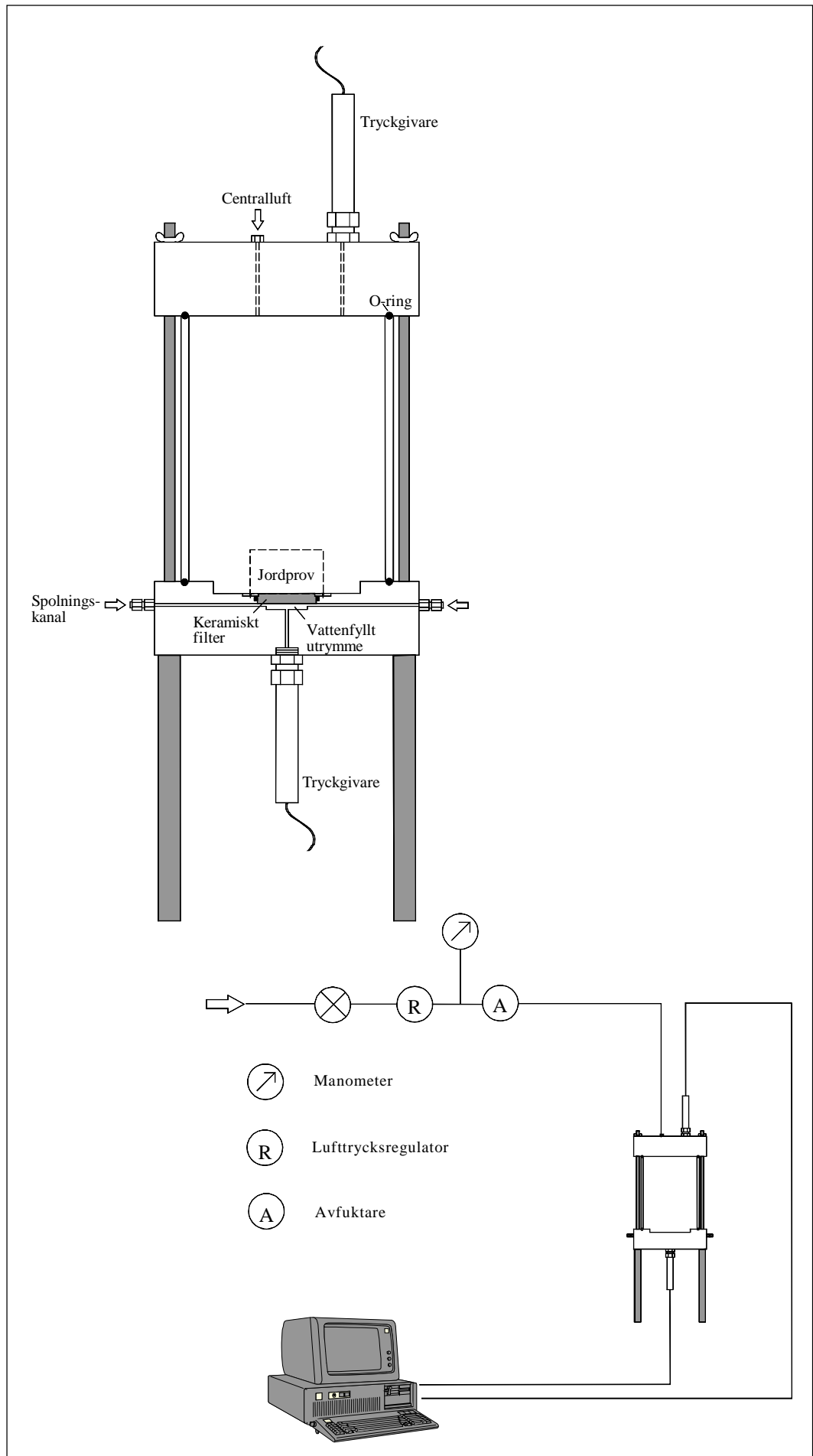
Bottenplattans keramiska filter har samma diameter som provet, dvs 50 mm för prover som tagits med standardkolvprovtagare. Vattnet i systemet är avluftat och tryckluften är avfuktad. Utrustningen placeras i ett klimatarum så att jorden får samma konstanta temperatur som råder i fält.

5.10.2 Försöksutförande

Jordprovet placeras på filterstenen. Eftersom provet inte är vattenmättat har det ett porvattenundertryck och försöker suga vatten från filterstenen, vilket resulterar i att vattentrycket i utrymmet under filterstenen sjunker. Lufttrycket i kammaren ökas så att tendensen till vattensugning stoppas. Detta uppnås då tryckgivaren för det vattenfyllda utrymmet under filterstenen visar noll. Lufttrycket regleras ytterligare några gånger med tiden till dess att jämvikt har uppnåtts, dvs till dess att ingen tendens till vattensugning finns eller uppstår med tiden. Den slutliga skillnaden mellan lufttrycket i kammaren och trycket i det vattenfyllda utrymmet utgör ett mått på det negativa porvattentrycket.

Vid mätning av negativa portryck i laboratorium används speciella celler.

Fig. 5.6
Utrustning för
mätning av ne-
gativa porvat-
tentryck.



Att läsa vidare:

- (1) **Karlsson, R. & Hansbo, S. (1984).** Jordarternas indelning och benämning. Geotekniska laboratorieanvisningar, del 2. Bygghälsöförskningsrådet.
- (2) **ASTM (1992).** Standard D2487-92; Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). ASTM, Philadelphia, Pennsylvania.
- (3) **CEN-SC7-ENV Förnorm till Eurocode 7: Geotechnical design – Part 2: Geotechnical design assisted by laboratory tests.** European Committee for Standardization, Brussels.
- (4) **Larsen, G., Frederiksen, J., Villumsen, A., Fredericia, J., Gravesen, P., Foged, N., Knudsen, B. & Baumann, J. (1995).** Guide to engineering geological soil description. Danish Geotechnical Society, Bulletin No. 1, Revision 1, 1995, Lyngby.
- (5) **SS 02 71 14 (1975)** – Bestämning av skrymdensitet. SS 02 71 16 (1977) – Vattenkvot och vattenmättnadsgrad. SS 02 71 18 (1989) – Konsistensgränser, beteckningar och förklaringar. SS 02 71 20 (1989) – Konsistensgränser - Konflytgräns. SS 02 71 21 (1977) – Konsistensgränser - Plasticitetsgräns. SS 02 71 23 (1992) – Kornfördelning, Siktning. SS 02 71 24 (1992) – Kornfördelning, Sedimentering. SS 02 71 25 (1991) – Skjuvhållfasthet - Fallkonförsök. SS 02 71 26 (1991) – Kompressionsegenskaper – ödometerförsök – CRS-försök - Kohesionsjord. SS 02 71 27 (1991) – Skjuvhållfasthet – Direkta skjuvförsök, CU- och CD-försök - Kohesionsjord. SS 02 71 29 (1992) – Kompressionsegenskaper – ödometerförsök med stegvis pålastning - Kohesionsjord.
- (6) **Öberg, A.-L. (1997).** Matrix Suction in Silt and Sand Slopes - Significance and Practical Use in Stability Analysis. Avhandling, Chalmers Tekniska Högskola, Inst. för Geoteknik, Göteborg.
- (7) **Larsson, R. (1995).** Jordmaterialet silt - geotekniska egenskaper och deras bestämning. Statens geotekniska institut, Rapport Nr. 49, Linköping.
- (8) **Olsson, R.E. & Langfelder, L.J. (1965).** Pore-Water Pressures in Unsaturated Soils. Proceedings, ASCE, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, Vol. 91, No. SM4, pp. 127-160.
- (9) **Fredlund, D. G. (1989).** Soil Suction Monitoring for Roads and Airfields. Symposium on the State-of-the-Art of Pavement Response Monitoring Systems for Roads and Airfields, West Libanon.
- (10) **Tremblay, M. (1992).** Study and Comparison of different Systems for Measuring Soil Suction. Artikler, foredrag, generalrapporter og andre bidrag, Nordiske geoteknikermøde, NGM-92, Aalborg, Vol. 1.
- (11) **Högsta U. & Öberg A.-L., (1992).** Negativa portryck och deras betydelse vid släntstabilitetsanalys. Rapport Nr. X 92:1, Institutionen för Geoteknik, Chalmers tekniska högskola, Göteborg.
- (12) **Hilf J. W., (1956).** An Investigation of Pore-Water Pressure in Compacted Cohesive Soils. Tech. Memo. 654, U. S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation Design and Construction Div, Denver, Colorado.

6. Beräkning av släntstabilitet och bärighet för fundament

6.1 Släntstabilitetsanalys med hänsyn till negativa portryck

Arbetsgång:

- Följ Skredkommissionens anvisningar
- Utför besiktning och kontrollera speciellt riskerna för yterrosion och erosion vid släntån.
- Utför översiktlig stabilitetsberäkning, t.ex. enligt direktmetoden. Empiriskt bedömda effektiva negativa portryck kan användas.
- Om säkerhetsfaktorn enligt översiktlig utredning är otillräcklig, utför en detaljerad utredning baserad bland annat på uppmätta och prognosticerade portryck.

Vid stabilitetsanalyser i branta silt- och sandslänter är det nödvändigt att ta hänsyn till negativa portryck liksom eventuella cementeringseffekter och vegetation.

6.1.1 Släntstabilitetsutredning

Anvisningar för hur stabilitetsutredningar skall utföras ges i Skredkommissionens Rapport 3:95 (1). Dessa anvisningar omfattar dock inte hur man skall ta hänsyn till negativa portryck och nedan anges erforderliga kompletteringar.

Vid stabilitetsanalys med hänsyn till negativa portryck beräknas skjuvhållfastheten längs den del av glidytan där negativa portryck råder enligt

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_{eff}) \tan \phi'$$

Skjuvhållfastheten kan också tecknas som

$$\tau_f = c + c_a + \sigma \tan \phi'$$

där $c_a = -u_{eff} \tan \phi'$

Det senare alternativet gör det möjligt att beräkna stabiliteten med hänsyn till negativa portryck, oberoende av vilken beräkningsmetod och vilket beräkningsprogram som an-

vänds. Nackdelen är att kohesionen måste beräknas manuellt och att ingen kontinuerlig funktion erhålls för denna parameter.

I en *översiktlig utredning* för en slänt med siltjord är det ofta tillräckligt att bedöma den negativa portrycksprofilen med hjälp av befintliga geotekniska undersökningar. Med kännedom om kornstorleksfördelning, vattenmättnadsgrad och grundvattenytans läge kan man uppskatta de effektiva negativa portrycken med hjälp av empiri, se Avsnitt 2.4. Överslagsberäkningar av stabiliteten kan sedan göras för hand med Janbus direktmetod (2) eller med hjälp av ett datorprogram för stabilitetsanalys

Beräkningen av säkerhetsfaktor med Janbus direktmetod med dränerad analys baseras på tåcirklar, homogen jordlagerföljd och horisontell grundvattenyta. I siltslänter är dessa förutsättningar normalt inte uppfyllda eftersom jordlagren, hållfasthetsegenskaperna och de negativa portrycken varierar och grundvattenytan lutar. Man kan dock i de flesta fall göra en godtagbar approximation av förhållandena så att direktmetoden kan användas. Hur detta görs beskrivs närmare i Appendix, där även exempel på beräkning av släntstabilitet visas.

Vid en *detaljerad utredning* av släntstabilitet i silt krävs att portrycksprofilen bestäms genom mätning. Detta innebär att även de negativa portrycken måste mätas. Därefter kan de effektiva negativa portrycken bestämmas enligt Avsnitt 2.4.

Exempel på hur stabiliteten beräknas vid en detaljerad utredning ges också i Appendix.

6.1.2 Inverkan på stabiliteten av rötter och rottrådar och eventuella cementeringseffekter

Den positiva inverkan av rötter och rottrådar på stabiliteten kan vara stor i ytlagret, men avtar snabbt med djupet. Dess utbredning beror på vegetationstyp, jordart och vattenmättnadsgrad m.m. Rotsystemet är normalt mest utbrett 0,2 – 0,3 m under markytan, men kan vid viss vegetation nå flera meter ned i jorden. Tillskottet i kohesion av vegetationen har t.ex. av utländska forskare utvärderats vara i storleken 20 kPa på 0,1 m djup men endast cirka

Här kompletteras med hur man tar hänsyn till negativa portryck, vilket inte framgår av Skredkommissionens anvisningar.

1 kPa på 1 á 2 m djup (3, 4). Kunskapen om svenska växters inverkan är begränsad och bör inte tas med som en beräkningsfaktor i en stabilitetsanalys. Vegetationens främsta positiva effekt i slänter är att den förhindrar yterrosion, vilket inte är direkt beräkningsbart.

Cementering av jordpartiklar beror på kemiska processer. Det är främst utfällningar av järnoxider och magnesiumoxider som orsakar cementering. Landhöjningen under den postglaciala epoken har varit gynnsam för dessa kemiska processer. De mycket branta partier, ibland med negativ lutning, som existerar i de geologiska bildningarna i siltiga jordar är delvis resultat av en sådan cementering. Kunskapen om i vad mån cementeringseffekter kan påräknas vid stabilitetsanalys för djupare glidytor är dock begränsad och man bör inte utnyttja dessa effekter vid en normal släntstabilitetsanalys. De tjänar främst som förklaring till varför vissa partier av en slänt kan stå brantare än vad som annars skulle vara möjligt enligt gängse beräkningsmetoder.

6.2 Beräkning av bärighet för fundament

Arbetsgång:

- Bedöm dräneringsförhållandena i jorden och om restriktioner för belastningshastighet eller portryckskontroll erfordras.
- Bedöm om någon effekt av negativa portryck kan påräknas.
- Beräkna brottlast för brottgränstillstånd enligt allmänna bärighetsekvationen.
- Beräkna brottlast med hänsyn till eventuella brottkriterier baserade på en viss storlek på sättningarna.

6.2.1 Portrycksgenerering vid pålastning

Vid de flesta fall av pålastning på silt, som t.ex. grundläggning av byggnader på plattor eller uppbyggnad av väg- och järnvägsbankar, sker lastökningen så långsamt att de porövertryck som skapas hinner avgå i samma takt. I speciellt lerig silt och vid hastigare pålastning, skapas ofta kvarstående porövertryck som reducerar bärförmågan. Möjligheten för att detta skall ske kan uppskattas, dels genom klassificering av materialet ur dräneringssynpunkt med ledning av dilatometerförsök och studier av portrycksutjämningsförlopp vid CPT-sondering, dels genom beräkning av konsolideringsförloppet med försiktiga antaganden om modul och permeabilitet.

Om dessa uppskattningar visar att det finns en påtaglig möjlighet för en portrycksuppbyggnad under upplastningen, bör belastningstakten ändras för att eliminera denna risk och/eller ett kontrollprogram upprättas, där portrycken mäts under hela upplastningsperioden.

Då belastningar har påförts på tjälad jord, eller jorden under belastningen fått tjäla, finns också risk för att stora porövertryck skall uppstå då jorden tinar.

Vid mycket hastig belastning, som vågbelastningar, belastningar och vibrationer från trafik, skakningar från sprängning och jordbävning och liknande, uppträder silt i princip som odränerat material. Stora portrycksförändringar, både positiva och negativa kan då uppstå. I sådana fall måste bärigheten kontrolleras med odränerad totalspänningsanalys baserad på odränerad skjuvhållfasthet eller alternativt effektivspänningsanalys med beräknad portrycksutveckling under odränerade förhållanden.

6.2.2 Bärighet för plattor och liknande fundament vid brottgränstillstånd

Jordens bärförmåga med avseende på brott beräknas med allmänna bärighetsekvationen. Denna är utförligt beskriven i handboken Plattgrundläggning (5) avsnitt 2.42 och kompletterad med speciellt avseende på silt i SGI Rapport Nr. 54 (6).

Vid projektering och beräkning av bärförmåga för grundplattor används Boverkets konstruktionsregler, BKR 94 (7). I dessa regler används partialsäkerhetsfaktorer för laster, egenskaper och beräkningsmetoder samt indelning av konstruktioner i olika klasser med tillhörande krav. Detta behandlas inte i denna skrift. BKR behandlar inte sådana aspekter som effekter av negativa portryck eller den kontinuerligt krökta last-sättningskurvan.

Uppskattning av effekten av negativa portryck

Inverkan av negativa portryck på bärigheten kan vara betydande. Innan denna inverkan utnyttjas, måste man försäkra sig om att de negativa portrycken kvarstår under hela den tidsrymd som bärighetsberäkningen avser och noga analysera vilken storlek på de negativa trycken som kan påräknas. Har inte detta gjorts, bör man inte tillgodoräkna sig några effekter av negativa portryck vid bärighetsberäkningen.

Inverkan av negativa portryck på bärigheten kan vara betydande.

På motsvarande sätt påverkas resultaten av olika plattförsök och pressometerförsök av de negativa portryck som råder vid provningstillfället, vilket man måste ta hänsyn till vid utvärdering och användning av resultaten.

Effekten av de negativa portrycken kan omvandlas till en "falsk kohesion", c_a . Denna utvärderas som:

$$c_a = -u_{eff} \tan \phi'$$

Om värden på vattenmättnadsgraden saknas kan en grov uppskattning göras enligt

$$c_a \approx -0,5u_w \tan \phi'$$

eller hellre ur det diagram som presenterats i Fig. 2.16. För vidare detaljer se Avsnitt 2.4 och 2.5.

Den falska kohesionen adderas till det kohesionsvärde som eventuellt redan finns hos de effektiva hållfasthetsparametrarna och summan insätts sedan som kohesion, c , i bärlig-hetsekvationen.

Andra metoder för bärlighetsberäkning

I många fall inträffar ett verkligt brott i jorden först efter mycket stora sättningar. Dessa är ofta så stora att den grundlagda konstruktionen kollapsat eller blivit obrukbar långt dessförinnan. Man använder därför ofta ett alternativt brottkriterium som definieras som den grundpåkänning som medför att en maximal relativ sättning uppnås. Ett vanligt sådant kriterium är att sättningarna uppgår till 10 % av fundamentets bredd, $S/b = 0,1$. Bärligheten kontrolleras då med hjälp av sättningsberäkningar på samma sätt som för bruksgränstillståndet, se Kapitel 7.

Beräkning av bärlighet i silt kan göras på basis av pressometerförsök med de metoder som beskrivs i handböckerna Bygg (8), Plattgrundläggning (5), och The Pressuremeter Test (9). Det skall dock observeras att resultaten av pressometerförsöken är mycket känsliga för rådande portryckssituation och den beräknade bärligheten gäller endast för motsvarande situation som vid försökstillfället. Någon korrektionsmetod för variationer i grundvattenstånd och negativa portryck finns inte och följaktligen finns risk för att bärligheten överskattas.

De empiriska utvärderingsmetoder för bärlighet av fundament på sand, som utarbetats för olika sonderingsmetoder, är inte användbara för silt.

6.2.3 Beräkning av acceptabel grundpåkänning vid bruksgränstillstånd

Acceptabel grundpåkänning i bruksstadiet definieras som den grundpåkänning som ger en för konstruktionen maximal acceptabel sättning och/eller maximala differenssättningar mellan olika delar av konstruktionen. Den acceptabla grundpåkänningen beräknas med de metoder för sättningsberäkning som anges i Kapitel 7. För att relevanta grundpåkänningar skall kunna beräknas, bör man använda en beräkningsmetod som beaktar last-sättningskurvornas krökta förlopp.

Att läsa vidare:

- (1) **Skredkommissionen (1995)**. Anvisningar för släntstabilitetsutredningar. Rapport 3:95, Linköping.
- (2) **Janbu, N. (1954)**. Stability analysis of slopes with dimensionless parameters. Thesis, Harvard University, Cambridge, Massachusetts.
- (3) **Wu, T. H., Ristenberg, M. M. & Flege, A. (1994)**. Root properties for Design of Slope Stabilization. Proceedings, International Conference on Vegetation and Slopes-Stabilisation, Protection and Ecology, University Museum, Oxford, 29-30 Sept.
- (4) **Gray, G. H. (1994)**. Influence of Vegetation on the Stability of Slopes. Proceedings, International Conference on Vegetation and Slopes-Stabilisation, Protection and Ecology, Paper No. 2, University Museum, Oxford, 29-30 Sept.
- (5) **Bergdahl, U., Ottosson, E. & Malmberg, B. S. (1993)**. Plattgrundläggning. Svensk Byggtjänst, Solna.
- (6) **Larsson, R. (1997)**. Investigations and load tests in silty soils -Results from a series of investigations in silty soils in Sweden. Statens geotekniska institut, Rapport Nr. 54, Linköping.
- (7) **Boverket (1993)**. Boverkets konstruktionsregler BKR 94, BFS 1993:58 med ändringar BFS 1995:18, Stockholm.
- (8) **Hansbo, S. & Sällfors, G. (1984)**. Jordmekanik. Handboken Bygg, Geoteknik, Kapitel G 05, Liber Förlag, Stockholm.
- (9) **Baguelin, F., Jezéquel, J.F. & Shields, D.H. (1978)**. The Pressuremeter and Foundation Engineering. Trans. Tech. Publications.

Risk finns att bärligheten överskattas.

7. Beräkning av sättningar

Sättningar i silt :

- Beräknas normalt med spänningsfördelning enligt elasticitetsteori och utvärderade moduler.
- Sättningar vid plattgrundläggning kan också beräknas på basis av pressometerförsök med användande av de speciella metoder som utarbetats för resultat från detta försök.
- De speciella metoder som ofta används för att beräkna av sättningar i sand på basis av CPT-sondering och hejarsondering kan inte användas i silt.

Vid projektering och beräkning av sättningar för grundplattor används Boverkets konstruktionsregler, BKR 94 (1). I dessa regler används partialsäkerhetsfaktorer för laster, egenskaper och beräkningsmetoder samt indelning av konstruktioner i olika klasser med tillhörande krav. Detta behandlas inte i denna skrift. BKR behandlar inte sådana aspekter som effekter av negativa portryck eller den kontinuerligt krökta last-sättningskurvan.

7.1 Beräkning med spänningsfördelning enligt elasticitetsteori och moduler

7.1.1 Elasticitetsteori

Beräkning av spänningsfördelning enligt elasticitetsteori är väl etablerad och närmare beskriven i t.ex. handböckerna Bygg (2) och Plattgrundläggning (3). Ett stort antal dator-

program för ändamålet finns också tillgängliga. Olika förenklade metoder, typ 2:1 metoden, har tidigare använts i viss omfattning, men dessa medför onödiga felkällor.

Sättningarna beräknas som

$$s = \sum_0^z \frac{\Delta\sigma'_z}{E_z} \Delta z$$

där z är djup under nivån för belastningens påförande. $\Delta\sigma'_z$ är ökningen i vertikalspänning och E_z är sättningsmodulen som medelvärden inom djupintervallet Δz .

Vid sättningsberäkningar för utbredda flexibla laster som bankar och fyllningar kan sättningarna beräknas för ett antal punkter inom fyllningens utbredning, så att både maximal sättning och sättningsvariation kan uppskattas. Vid beräkning under styva plattor beräknas sättningen under den "karakteristiska punkten", Fig. 7.1.

Om den belastade ytan har en begränsad utbredning, vilket normalt är fallet för grundplattor, medför lastspridningen i jorden att tillskottsspänningarna på större djup blir mycket små. Ofta begränsas sättningsberäkningen till det djupintervall där spänningsökningen är minst 10 % av det ursprungliga effektiva överlagringstrycket (3).

Denna förenkling kan inte användas i profiler där jordens fasthet avtar med djupet och/eller markant lösare lager finns på större djup, vilket ofta är fallet i jordprofiler med silt och speciellt växellagrad silt och lera. I sådana fall måste sättningsberäkningarna omfatta all kompressibel jord som utsätts för en verklig spänningsökning.

När jordens fasthet avtar med djupet måste sättningsberäkningarna omfatta all kompressibel jord som utsätts för en verklig spänningsökning.

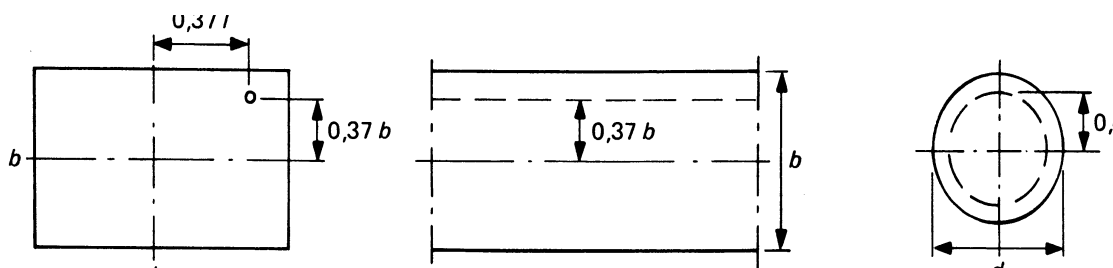


Fig. 7.1 Den karakteristiska punktens läge vid sättningsberäkning.

Sättningsberäkning med empiriska moduler är en avsevärd förenkling.

7.1.2 Moduler

Vid översiktlig sättningsberäkning i silt används normalt moduler empiriskt utvärderade ur CPT-sondering, eller hejarsondering i jordlager där CPT-sonden inte kan drivas ned (4). Vid mer noggranna beräkningar används moduler bestämda med dilatometerförsök. I normalt konsoliderade eller endast svagt överkonsoliderade leriga partier av profilen kompletteras med moduler ur ödometerförsök.

Empiriska moduler ur sonderingar och moduler ur dilatometerförsök fås som konstanta värden. I princip resulterar dessa i beräknade sättningar som är linjärt proportionella mot påförd belastning. Detta är en avsevärd förenkling. I fall med *utbredd belastning* beror sättningarna nästan uteslutande på en vertikal sammantryckning och volymminskning i jorden, medan horisontaldeformationerna är försumbara. Modulen varierar då på så vis att en

hög modul erhålls för små tilläggsbelastningar, för vilka jorden normalt är överkonsoliderad. Vid ytterligare ökande spänningar sjunker modulen för att sedan vid ännu högre spänningar öka linjärt (eller exponentiellt) med spänningarna, *Fig. 7.2*.

Detta uppträdande uppmäts generellt för lerprover i ödometer och gäller i princip också för silt. Det är dock mycket svårt att erhålla så ostörda prover i silt att moduler och förkonsolideringstryck, som är representativa för förhållandena i fält, kan mätas i laboratoriet. De moduler som utvärderas ur sonderingar motsvarar modulen då förkonsolideringstrycket just passerats, och någon hänsyn tas vare sig till effekter av överkonsolidering eller av hårdnande vid högre spänningar.

Moduler utvärderade ur dilatometerförsök påverkas till viss del av överkonsolideringseffekter, men inte av det efterföljande hårdnandet. I överkonsoliderad jord blir de sättningar som beräknas med moduler från sonderingar därför normalt för stora. Också sättningar som beräknas med moduler från dilatometerförsök kan på motsvarande sätt tendera att bli för stora i vissa fall. Metoder för att modifiera modulerna med ledning av den empiriska kunskapen om deras normala variation finns, men används sällan i praktiken (5, 6). Samtliga ovannämnda felkällor medför att de beräknade sättningarna tenderar att bli på säkra sidan, dvs. för stora.

I fall med *begränsad utbredning av belastningen*, som vid plattgrundläggning, uppstår horisontella rörelser, skjuvdeformationer, som tillägg till den vertikala kompressionen av jorden. Horisontalrörelsernas relativa betydelse för den totala sättningen ökar ju mer lasten ökar och skjuvhållfastheten tas i anspråk. Detta resulterar i ett spännings- och deformationsmjuknande uppträdande i jorden där sättningsmodulen successivt minskar. Last-sättningskurvan blir på detta vis en exponentiell funktion och sättningarna går mot oändligheten då hållfastheten (bärligheten) är fullt mobiliserad, *Fig. 7.3*.

Också i detta fall tenderar de sättningar, som beräknas med de utvärderade modulerna, att bli för stora vid små lastökningar. Vid belastningar över en viss gräns underskattas dock de verkliga sättningarna. Resultaten från ett antal plattformförsök i stor skala har visat att den punkt, där beräknade linjära sättningar och den krökta last-sättningskurvan överensstämmer, motsvarar en relativ sättning av cirka 0,014B, där B är plattans bredd (7).

Fig. 7.2
Modulens variation med spänningsnivån vid utbredd belastning (ödometerfallet).

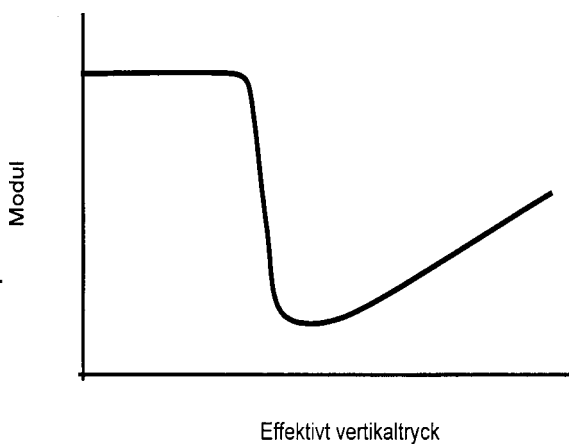
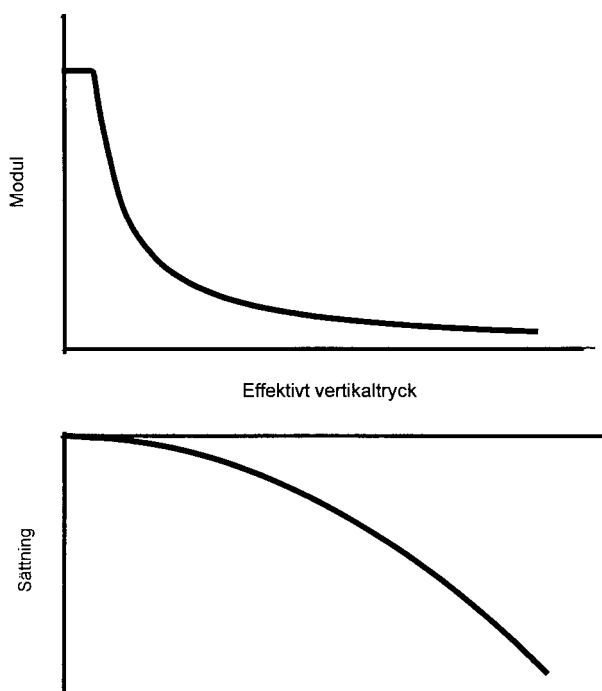


Fig. 7.3
Modulens variation och last-sättnings samband vid last med begränsad utbredning.



7.1.3 Beräkning enligt krökta last-sättningskurvan

Den *krökta last-sättningskurvan* kan beräknas på följande sätt (7):

1. Beräkna en sättningsfaktor, F_s , som innefattar tjockleken av de jordlager som omfattas i beräkningen, spänningsfördelningen i lagren och sättningsmodulens variation enligt

$$F_s = \sum_0^z \frac{f}{E} \Delta z$$

där f = influensfaktor för delskiktet Δz under den karakteristiska punkten enligt elasticitetsteorin.

2. Beräkna det jämförelsegrundtryck, q_{ref} , som ger referenssättningen $s_{ref} = 0,014B$ enligt $q_{ref} = 0,014B/F_s$
3. Beräkna den relativa sättningen s/B för det aktuella grundtrycket, q , enligt

$$\frac{s}{B} = 0,014 \left(\frac{q}{q_{ref}} \right)^2$$

Beräkningen gäller för grundtryck som ligger väl under det gränstryck där bärlighetsbrott inträffar. Vid kontroll av att detta villkor uppfylls, måste man ta hänsyn till bärlighetens beroende av portryckssituationen, se Avsnitt ”Beräkning av bärlighet”. Sättningar som beräknas på detta vis med empiriskt utvärderade sättningsmoduler avser normalt 10-årssättningar.

7.2 Beräkning på basis av pressometerförsök

Beräkning av sättningar vid plattgrundläggning kan göras på basis av pressometerförsök enligt regler i handböckerna Bygg (2) och Plattgrundläggning (3). Speciell uppmärksamhet måste då riktas på försökets kvalitet, vilket kan bedömas ur angivna riktlinjer. Det är viktigt att beakta att de gränstryck som utvärderas, och på vilka den beräknade bärligheten baseras, endast gäller för den portryckssituation som rådde vid provningstillfället. Man måste därför vara försiktig, speciellt i jordar med negativa portryck, så att inte bärligheten överskattas och sättningarna vid högre tryck underskattas.

Den ovannämnda metoden att beräkna sättningar ger ett rätlinjigt samband mellan pålagd last och sättning. En ny metod för att beräkna

den krökta last-sättningskurvan för belastade grundplattor har presenterats (7, 8). Metoden är endast begränsat utprovad och resultaten är beroende av försökskvaliteten (kvaliteten på det förborrade hålet). Försiktighet med avseende på bärligheten och dess beroende av portryckssituationen måste också observeras.

7.3 Inverkan av tid och cyklisk belastning

Sättningarna ökar med tiden, också efter att en eventuell hydrodynamisk fördröjning upphört, och en cyklisk belastning medför att sättningarna ökar ytterligare med antalet cykler och med lastvariationens storlek. Effekten av cykliska belastningar blir därför att sättningsökningen med tiden blir större än för statisk belastning.

För statiska belastningar brukar man schablonmässigt räkna med att sättningsförändringen med tiden kan beräknas ur

$$\frac{S_t}{S_{0,1\text{år}}} = 1 + 0,2 \log \left(\frac{t}{0,1} \right)$$

där S_t = sättning vid tiden t
 $S_{0,1\text{år}}$ = initialsättning efter 0,1 år
 t = tid, år

(Här skall dock observeras att de olika moduler som normalt används avser att motsvara 10-årssättningar.)

Faktorn 0,2 inbegriper de mindre variationer som uppstår även vid s.k. statiska lastfall.

På basis av långtidsuppföljningar av sättningar av brofundament på sand har utvecklats ett samband som tar hänsyn till lastvariationens storlek (9). Enligt detta beräknas först initialsättningen efter 0,1 år. Därefter beräknas sättningen med tiden enligt

$$\frac{S_t}{S_{0,1\text{år}}} = 1 + \left(\frac{q_{max}}{q_{min}} \right)^{3,6} \cdot 0,2 \log \left(\frac{t}{0,1} \right)$$

där S_t = sättning vid tiden t
 $S_{0,1\text{år}}$ = initialsättning efter 0,1 år beräknad med normala lastantaganden, t.ex. enligt BRO 94.
 q_{max} = grundtryck av maximal last = egentygnd + full rörlig last
 q_{min} = grundtryck av enbart egentygnd
 t = tid, år

Cykliska belastningar ger sättningsökningar med tiden som är större än för statisk belastning.

I de fall sättningarna beräknas med en metod som resulterar i 10-årssättningar, förändras uttrycket till

$$\frac{S_t}{S_{10\text{år}}} = \frac{1}{1,4} \cdot \left[1 + \left(\frac{q_{\text{max}}}{q_{\text{min}}} \right)^{3,6} \cdot 0,2 \log \left(\frac{t}{0,1} \right) \right]$$

där $S_{10\text{år}}$ = beräknad 10-årssättning för statisk last

Detta ger en relation mellan 10-årssättningar för statisk last och variabel last, med en frekvens för lastväxlingarna som är typisk för vägtrafik, enligt Fig. 7.4.

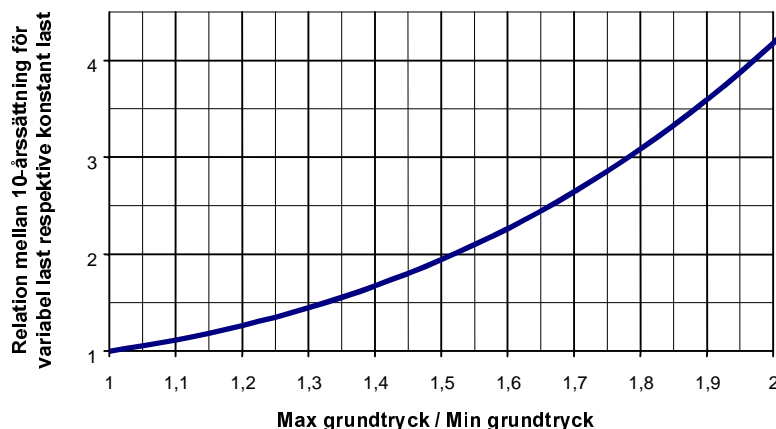
Relationen gäller för vägbroar på sand men kan i princip förväntas gälla också för silt, speciellt grovsilt. På grund av att en del av effekterna av kortvariga lastökningar kan tas upp som portrycksökningar, som inte hinner utjämnas under lastens varaktighet, kan exponenten 3,6 förväntas variera i silt med jordens permeabilitet och grundvattenytans läge.

Relationen för vägbroar på sand kan i princip förväntas gälla också för silt.

Att läsa vidare:

- (1) **Boverket (1993)**. Boverkets konstruktionsregler BKR 94, BFS 1993:58 med ändringar BFS 1995:18, Stockholm.
- (2) **Hansbo, S. & Sällfors, G. (1984)**. Jordmekanik. Handboken Bygg, Geoteknik, Kapitel G 05, Liber Förlag, Stockholm.
- (3) **Bergdahl, U., Ottosson, E. & Malmberg, B. S. (1993)**. Plattgrundläggning. Svensk Byggtjänst, Solna.
- (4) **Larsson, R. (1997)**. Investigations and load tests in silty soils - Results from a series of investigations in silty soils in Sweden. Statens geotekniska institut, Rapport Nr. 54, Linköping.
- (5) **Schmertmann, J. H. (1986)**. Dilatometer to Compute Foundation Settlement. Proceedings of In Situ 86, a Specialty Conference on Use of In Situ Tests in Geotechnical Engineering. Blacksburg, Virginia. ASCE, New York.
- (6) **Leonards G. A. & Frost, J. D. (1988)**. Settlement of shallow foundations on granular soils. ASCE, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 114, No. 7, pp. 791-809.
- (7) **Larsson, R. (1997)**. Beräkning av sättningar av plattor på sand och silt-beräkningsmetoder som beaktar last-sättnings-sambandets olinjäritet. Statens geotekniska institut, Varia No. 459, Linköping.
- (8) **Briaud, J.-L. (1995)**. Pressuremeter Method for Spread Footings on Sand. The Pressuremeter and its New Avenues. Ballivy (ed.), Balkema, Rotterdam.
- (9) **Rehman, S.-E. (1996)**. Time dependent settlement for bridge footings on sands. XII Nordiska geoteknikermötet, NGM - 96, Reykjavik, pp. 209 - 212.

Fig. 7.4
Relation mellan 10-årssättningar för variabel respektive statisk last på fundament grundlagda på sand. (9).



Appendix

Beräkning av släntstabilitet med hänsyn till negativa portryck

Överslagsberäkning med Janbus direktmetod

Detta avsnitt utgör ett komplement till Skredkommissionens Rapport 3:95, avsnitt 7.2.2.1. där metoden beskrivs i detalj, men där inverkan av negativa portryck inte ingår. Tillhörande metodbeskrivning, beteckningar, förklaringar och diagram återfinns i Skredkommissionens rapport.

Vid beräkning av säkerhetsfaktor används Janbus direktmetod för dränerad analys, vilken baseras på tåcirklar, homogen jordlagerföljd och horisontell grundvattenyta. I siltslänter är dessa förutsättningar normalt inte uppfyllda eftersom jordlagren, hållfasthetsegenskaperna och de negativa portrycken varierar och grundvattenytan lutar. Man kan dock i de flesta fall göra en godtagbar approximation av förhållandena så att direktmetoden kan användas.

Vid en överslagsberäkning med Janbus direktmetod ansätts en friktionsvinkel som viktats med tyngdpunkten på de lägre värdena i profilen. Effekten av de negativa portrycken behandlas som en skenbar kohesion. För att kunna göra en ungefärlig uppskattning av glidyntans läge måste ett preliminärt c -värde antas, vilket används för att beräkna parametern λ_{cf} . Den preliminära glidyntan indelas därefter in i ett antal cirkelsegment och för varje segment med negativt portryck i glidyntan beräknas den skenbara kohesionen som

$$c_a = -u_w S_r \tan \phi' (= -u_{eff} \tan \phi')$$

Eventuella effektiva kohesionsintercept hos de effektiva hållfasthetsparametrarna adderas, $c = c' + c_a$, och därefter beräknas kohesionens medelvärde längs glidyntan som

$$\bar{c} = \frac{\sum c_i \Delta l_i}{\sum \Delta l_i}$$

För att ta hänsyn till en lutande grundvattenyta och de positiva portrycken måste parametern r_u bestämmas. För varje cirkelsegment med positiva portryck i glidyntan bestäms parametern $r_u = u/\gamma_z$. I övriga segment sätts $r_u = 0$ och ett medelvärde beräknas som

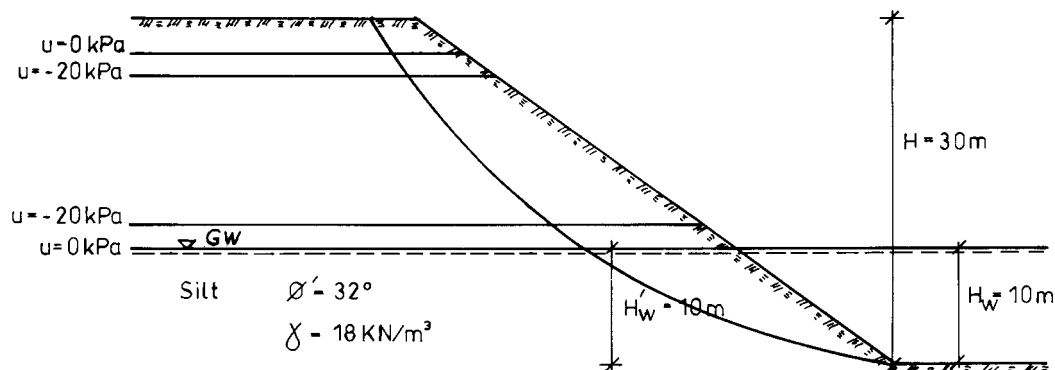
$$r_u = \frac{\sum r_{u_i} \Delta l_i}{\sum \Delta l_i}$$

Därefter kan parametern p_e bestämmas som $p_e = (1-r_u)\gamma H$. I de fall då det finns ett yttre vattentryck mot släntens nedre del sätts $H'_w = H_w$ och r_{ui} sätts till noll för alla segment som ligger under nivån för den yttre vattenytan. På detta sätt tar man hänsyn till det yttre vattenståndet i jämviktsbetraktelsen.

Nedan ges exempel på överslagsberäkning av stabiliteten för siltslänter med hänsyn till negativa portryck.

Exempel 1

Det första exemplet är en slänt i homogen silt med ett yttre vattenstånd mot släntens nedre del och en motsvarande inre grundvattenyta. De negativa portrycken i den intermediära zonen uppskattas till -20 kPa.



Bestämning av glidytns läge

För att hitta den farligaste glidytns läge måste ett preliminärt värde på c' antas. I detta fall har $c' = 6$ kPa valts med ledning av de negativa portrycken. Det inre vattenståndet och yttre vattenståndet är $H'_w = H_w = 10$ m. Dessa antaganden ger:

$$p_e \approx \frac{(18 \cdot 30 - 10 \cdot 10)}{1,0,96} = 458 \text{ kPa}$$

$$\lambda_{c\phi} \approx \frac{458 \tan 32}{6} = 48$$

$$b = 1,48$$

Ur Janbus diagram erhålls

$$N_{cf} \approx 90$$

Detta ger koordinaterna för den kritiska tårcirkelns ungefärliga centrum som $X_0 = -6$ och $Y_0 = 60$.

Beräkning av säkerhetsfaktorn:

När glidytns läge är bestämt delas glidytn in i cirkelsegment. De effektiva negativa portrycken räknas om till en skenbar medelkohesion utmed glidytn som

$$\bar{c} = \frac{\sum_{i=1}^n c_i \Delta l_i}{\Delta l_i} = 4,5$$

Därefter beräknas $\lambda_{c\phi}$ för den bestämda glidytn som

$$\lambda_{c\phi} = \frac{458 \cdot \tan 32}{4,5} = 63$$

$$b = 1,48$$

Kontroll av glidytns läge ger

$$N_{cf} = 110$$

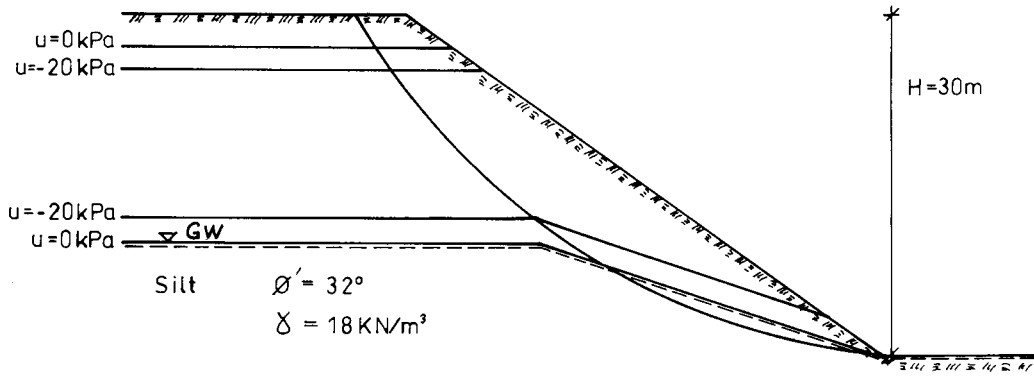
$X_0 = -6$ och $Y_0 = 62$ vilket ger en glidyta som är godtagbart nära den antagna.

Säkerhetsfaktorn kan då bestämmas som:

$$F_{c\phi} = 110 \frac{4,5}{458} = 1,08$$

Exempel 2

Detta exempel gäller samma slänt som i det första exemplet, men i detta fall finns inget yttre vattentryck och grundvattenytan under slänten lutar mot slänttån från den högre nivån bakom släntkrönet.



För att hitta den farligaste glidytns läge måste åter ett preliminärt värde på c' antagas. Detta sätts på motsvarande sätt till $c' = 6\text{ kPa}$. Det inre vattenståndet inverkar och kan förenklat antas till $H'_w \approx 2\text{m}$. Dessa antaganden ger:

$$p_e \approx \frac{(18 \cdot 30 - 2 \cdot 10)}{1 \cdot 0,98} = 531\text{ kPa}$$

$$\lambda_{c\phi} \approx \frac{531 \tan 32}{6} = 55$$

$$b = 1,48$$

Detta ger $N_{cf} \approx 100$

Detta ger koordinaterna för den kritiska tårcirkelns ungefärliga centrum som $X_0 = -6$ och $Y_0 = 60$.

När glidytns läge är bestämt delas glidytn in i cirkelsegment. De effektiva negativa porttrycken räknas om till en medelkohesion utmed glidytn som

$$\bar{c} = \frac{\sum_{i=1..n} c_i \Delta l_i}{\sum_{i=1..n} \Delta l_i} = 4,5$$

Därefter beräknas parametrarna för den bestämda glidytn som

$$r_u = \frac{\sum_{i=1..n} r_{ui} \Delta l_i}{\sum_{i=1..n} \Delta l_i} = 0,014$$

$$p_e = (1 - 0,014) \cdot 18 \cdot 30 = 532\text{ kPa}$$

$$\lambda_{c\phi} = \frac{532 \tan 32}{4,5} = 74$$

$$b = 1,48$$

$$N_{cf} = 120$$

Kontroll av glidytns läge:

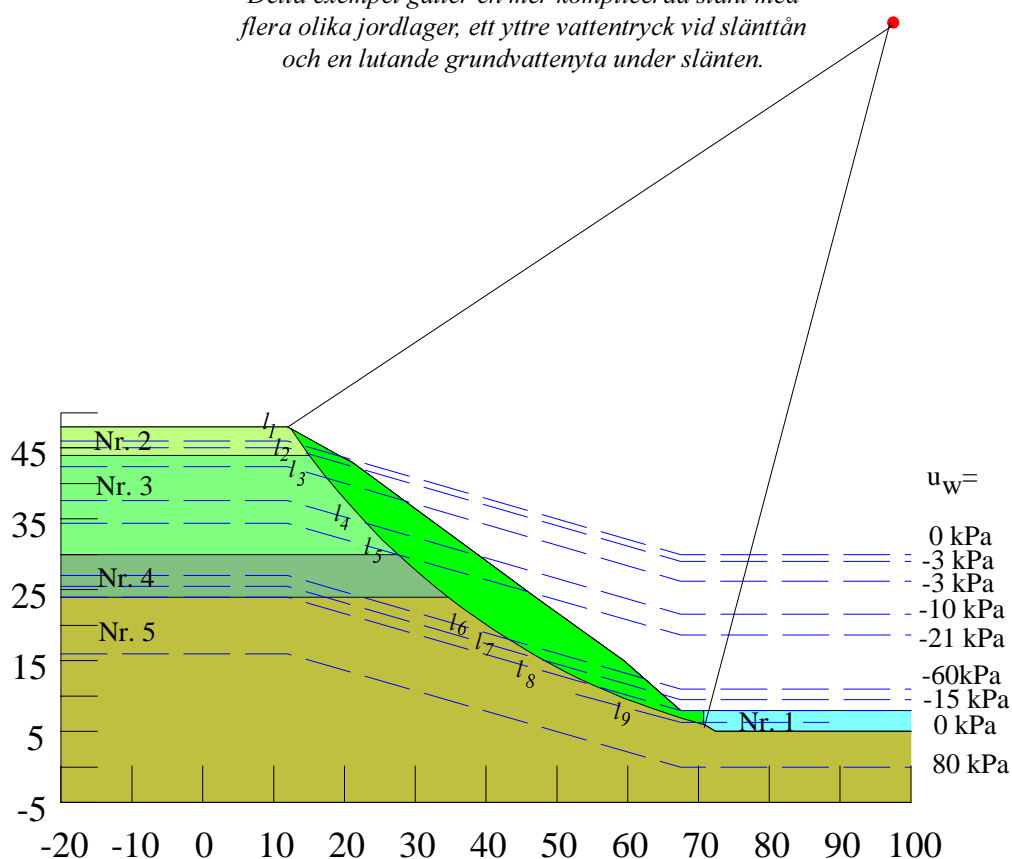
$$X_0 = -6 \text{ och } Y_0 = 60 \quad \text{OK!}$$

Säkerhetsfaktorn kan då bestämmas som

$$F_{c\phi} = 120 \frac{4,5}{30 \cdot 18} = 1,0$$

Exempel 3

Detta exempel gäller en mer komplicerad slänt med flera olika jordlager, ett yttre vattentryck vid slänttån och en lutande grundvattenyta under slänten.



Jordlagerföljden för slänten i exemplet består huvudsakligen av silt och sand. I följande tabell redovisas de geotekniska parametrarna för de olika jordlagren.

Jordlager Nr	Jordart	Tunghet kN/m^3	ϕ'	c' kPa
1	Vatten	10	-	-
2	Sandig Silt	19	34°	-
3	Silt	19	32°	-
4	Silt	19	30°	-
5	något lerig Silt	19	30°	8

Bakom släntkrönet återfinns grundvattenytan cirka 24 m under markytan och under slänten lutar den ungefär rätlinjigt mot slänttån. De effektiva negativa portrycken har uppskattats på de nivåer där kornfördelningskurvorna är bestämda, vilket i detta fall är 5,7 m, 10,3 m, 13,5 m och 21 m under markytan. De har bedömts med ledning av empiri.

För att hitta den farligaste glidytns läge antas ett preliminärt c -värde av 6 kPa, baserat på storleken av de negativa portrycken och det c' -värde som finns i jordlager 5. Dessutom har övriga jordegenskaper förenklats till

$\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$ och $\phi' = 31^\circ$. De inre och yttre vattenstånden har antagits till $H_w = H'_w \approx 3 \text{ m}$. Dessa antaganden ger:

$$p_e \approx \frac{(43 \cdot 19 - 3 \cdot 10)}{1} = 787 \text{ kPa}$$

$$\lambda_{c\phi} \approx \frac{787 \tan 31}{6} = 79$$

$$b = 1,25$$

Vilket ger $N_{cf} \approx 100$

Detta ger koordinaterna $X_0 = -17$ och $Y_0 = 88$ för ett ungefärligt centrum för den kritiska tårcirkeln.

När glidytn är uppskattad delas den in i cirkelsegment och negativa portryck och kohesionsintercept räknas om till en medelkohesion utmed glidytn som

$$\bar{c} = \frac{\sum_{i=1}^n c_i \Delta l_i}{\Delta l_i} = 15$$

Därefter beräknas parametrarna för den bestämda glidytan som

$$r_u = \frac{\sum_{i=1}^8 r_{ui} \Delta l_i}{\Delta l_i} = 0,01$$

$$p_e = (1 - 0,01) \cdot (19 \cdot 43 - 3 \cdot 10) = 779 \text{ kPa} \quad \text{där } c_a = -u_{eff} \tan \phi'$$

$$\lambda_{c\phi} = \frac{779 \tan 31}{15} = 31$$

$$b = 1,25$$

Kontroll av glidykans läge

$$X_0 = -15 \text{ och } Y_0 = 86 \quad \text{OK!}$$

Säkerhetsfaktorn kan då bestämmas som

$$N_{cf} = 52$$

$$p_d = (43 \cdot 19 - 3 \cdot 10) = 787$$

$$F_{c\phi} = 52 \frac{15}{787} = 1,0 \quad (0,99)$$

Beräkning med lamellmetod och datorprogram för stabilitetsberäkning

Vid stabilitetsanalys med hänsyn till negativa portryck beräknas skjuvhållfastheten längs glidytan enligt

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_{eff}) \tan \phi'$$

Skjuvhållfastheten längs glidytan kan också tecknas som

$$\tau_f = c + c_a + \sigma \tan \phi'$$

Det senare alternativet gör det möjligt att beräkna stabiliteten med hänsyn till negativa portryck oberoende av vilket beräkningsprogram som används. Nackdelen är att kohesionen måste beräknas manuellt och att ingen kontinuerlig funktion för kohesionen erhålls.

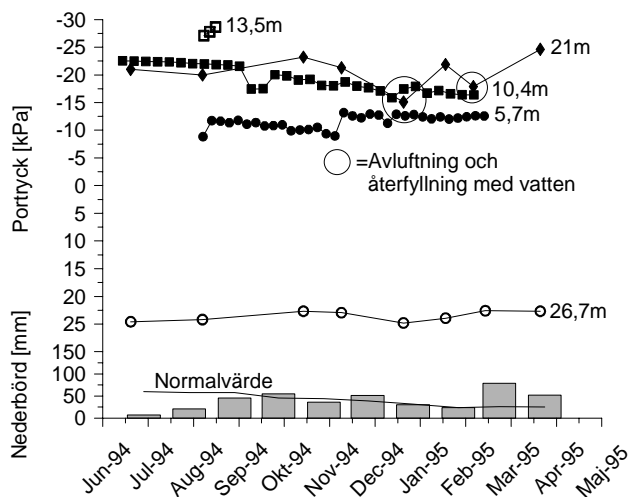
Detaljerad utredning

Vid en detaljerad utredning krävs att portrycksprofilen bestäms genom mätning. Detta innebär att även de negativa portrycken måste mätas. Därefter kan de effektiva negativa portrycken bestämmas enligt Avsnitt 2.4.

I exempel 4 visas beräkningar, där de negativa portrycken har bestämts direkt genom mätning.

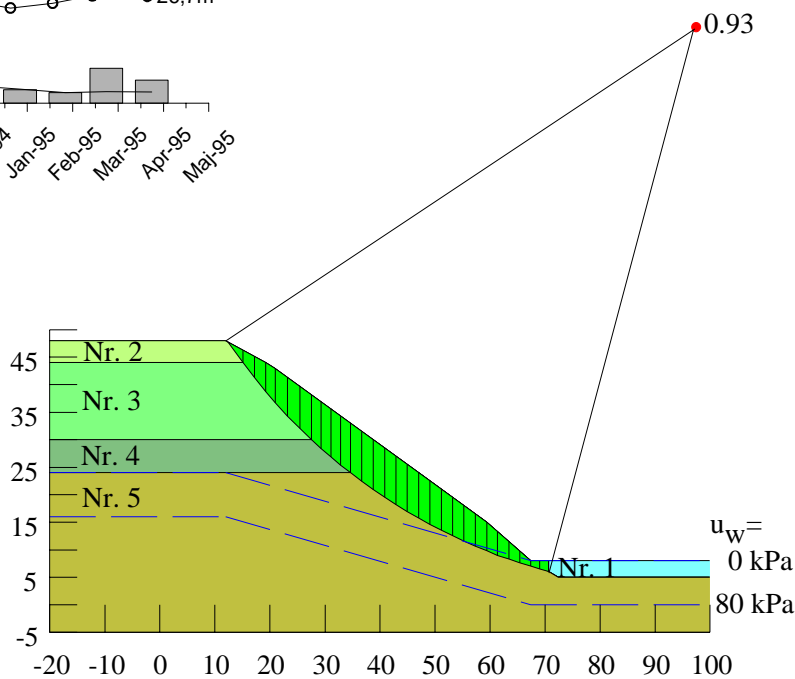
Exempel 4

De geotekniska parametrarna är de samma som i Exempel 3. Portrycken har mätts i fält på nivåerna 5,7, 10,4, 13,5, 21,0 och 26,7 meter under markytan och på motsvarande nivåer har också vattenmättnadsgraden bestämts. Resultaten av de mätningar som har utförts visas i nedanstående figur och de bedömda effektiva negativa portrycken redovisas i tabell.

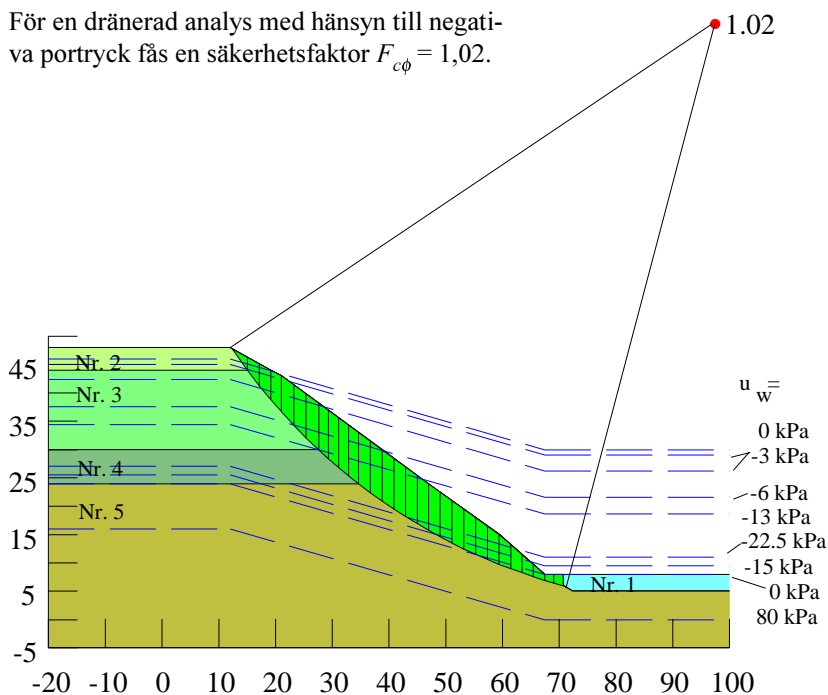


Djup under markytan [m]	Vattenmättnadsgrad [%]	Uppmätta negativa portryck in situ [kPa]	Effektivt negativt portryck ($u_w S_r$) [kPa]
2	-	-	0
3	-	-	-3
5,7	26	-12,5	-3
10,4	26	-22,5	-6
13,5	43	-30	-13
21	90	-25	-22,5
22,5	100	-	-15
24	0	-	0

För en konventionell dränerad analys utan hänsyn till negativa portryck fås en säkerhetsfaktor $F_{c\phi} = 0,93$.



För en dränerad analys med hänsyn till negativa portryck fås en säkerhetsfaktor $F_{c\phi} = 1,02$.



Kommentarer till exempel 4

Om de effektiva negativa portryck som kan uppskattas ur hela kornfördelningskurvan används i stället för uppmätta portryck fås en något högre säkerhetsfaktor $F_{c\phi} = 1,04$ för samma glidyta. Om de effektiva negativa portrycken väljs på basis av d_{50} -värdet fås en ytterligare något högre säkerhetsfaktor; $F_{c\phi} = 1,10$. Detta illustrerar att de empiriska utvärderingarna *inte* ger värden "på säkra sidan", att en viss spridning i den beräknade säkerhetsfaktorn för speciellt relativt grunda glidytor kan förväntas samt behovet av verkliga portrycksmätningar för en detaljerad analys.

En jämförelse av säkerhetsfaktorerna beräknade med direktmetoden och de som beräknas med datorprogram visar att de förra normalt är lägre, vilket är avsikten och bl.a. är en följd av de förenklade antaganden som görs i direktmetoden. Skillnaden varierar normalt mellan 0-10 %, men kan i undantagsfall bli större. Detta kan bero på den ofta komplexa jordlagerföljden och portrycksbilden samt att Janbus direktmetod från början inte är utvecklad för att hantera negativa portryck. De förenklingar som krävs för att kunna utföra beräkningarna kan i vissa fall bli omfattande, och därmed ökar osäkerheten hos den beräknade säkerhetsfaktorn. Trots detta ger den en relativt god bild av det översiktliga stabilitetsläget och en bra kontroll av rimligheten för den med datorprogram beräknade glidytan och säkerhetsfaktorn.



Statens geotekniska institut

581 93 Linköping

Tel: 013-20 18 00 Fax: 013-20 19 14

E-post: sgi@swedgeo.se Internet: www.swedgeo.se