



CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

GEOHYDROLOGISKA FORSKNINGSGRUPPEN

Geologi

Geoteknik med grundläggning

Vattenbyggnad

Vattenförsörjnings - och avloppsteknik

GRUNDVATTEN

UPPSATSER PRESENTERADE VID KONFERENS
OM URBAN HYDROLOGI I SARPSBORG,
NORGE 1975

Leif Andréasson
Leif Carlsson
Klas Cederwall
Bengt-Arne Torstensson
Per Wedel



CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

GEOHYDROLOGISKA FORSKNINGSGRUPPEN

Geologi

Geoteknik med grundläggning

Vattenbyggnad

Vattenförsörjnings - och avloppsteknik

GRUNDVATTEN

UPPSATSER PRESENTERADE VID KONFERENS
OM URBAN HYDROLOGI I SARPSBORG,
NORGE 1975

Leif Andréasson
Leif Carlsson
Klas Cederwall
Bengt-Arne Torstensson
Per Wedel

INNEHÅLL

FÖRORD

Överdir. Leif Andréasson (Statens Geotekniska Institut, Stockholm)
Docent Klas Sederwall (Inst. för vattenbyggnad, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg)

RUBBNINGAR AV GRUNDVATTENBALANSEN I URBANA OMRÅDEN 160-180

Leif Carlsson (Inst. för vattenförsörjnings- och avloppsteknik Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg)

DJUPINFILTRATION I SLUTNA AKVIFERER 193-212

(Infiltration in confined aquifers)

Tekn.dr Bengt-Arne Torstensson, AB Jacobsson & Widmark, Lidingö

FÖLJDER AV GRUNDVATTENSÄNKNING INOM LEROMRÅDEN 226-244

Docent Per Wedel (Geologiska inst, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg)

EXEMPEL PÅ DRÄNERING AV JORDLAGER P. G. A. TUNNELBYGGANDE 181-192

FÖRORD

Geohydrologiska forskningsgruppen vid Chalmers Tekniska Högskola arbetar med forskning rörande dagvatten- och grundvattenproblem inom bebyggda områden. Verksamheten finansieras med anslag från Statens råd för byggnadsforskning, BFR samt Göteborgs vatten- och avloppsverk.

Föreliggande uppsatser utgör gruppens bidrag inom dagvattenområdet till konferensen om urban hydrologi i Sarpsborg, Norge i juni 1975.

Uppsatserna är ett särtryck ur den fullständiga konferenspublikationen vars titel är:

Kvantitativ urban hydrologi
Nordisk symposium, Sarpsborg
11 - 13 juni 1975

Den norske komité för Den internasjonale hydrologiske dekadé, IHD.

Förteckning över skrifter utgivna i Geohydrologiska forskningsgruppens meddelandeserie är bilagda denna publikationen.

Göteborg i januari 1976

Klas Cederwall

Överdir. Leif Andréasson (Statens Geotekniska Institut, Stockholm)

Docent Klas Cederwall (Inst. för vattenbyggnad, Chalmers tekniska högskola, Göteborg)

RUBBNINGAR AV GRUNDVATTENBALANSEN I URBANA OMRÅDEN

Sammanfattning

Vid bebyggelseplanering av ett markområde måste erforderlig hänsyn tas till de geohydrologiska förhållandena, eftersom mark- och jordarbeten samt underjordsarbeten väsentligt påverkar den normala ytavrinningen och grundvattenbildningen. I denna uppsats diskuteras och exemplifieras den geohydrologiska bakgrunden till och de byggnadstekniska konsekvenserna av en rubbad grundvattenbalans i en lerfylld dalgång, som i det här sammanhanget är den mest aktuella typen av sättningsbenäget område.

1. INLEDNING

Människan har i alla tider påverkat sin omgivning och ändrat de naturliga förhållandena - inte minst påtagligt de hydrologiska - genom skogsavverkning, uppodling av mark och bebyggelse. Men sett i ett historiskt perspektiv är det egentligen ganska sent som urbaniseringsprocessen tog riktig fart i de industrialiserade länderna, och det är först på senare år som vi börjat få en klarare bild av de konsekvenser som detta koncentrerade, snabba samhällsbyggande medför.

I gamla tider avgränsade stadsmuren staden från omgivande landsbygd. Nu-förtiden breder bebyggelsen ut sig mer okontrollerat och vad som bör räknas som urbaniserat område eller ej är kanske inte så lätt att avgöra. Ur geohydrologisk synpunkt är ett område "urbaniserat" först sedan det undergått signifikanta förändringar på grund av sådana mänskliga åtgärder som väg- och husbyggnad, schaktningar och utfyllningar, asfaltering och andra ytbeläggningar av markområden, dräneringsarbeten osv. Av den serie av problem som sammanhänger med den nuvarande snabba urbaniseringsprocessen så skall vi här diskutera de följder som en rubbad grundvattenbalans kan få och i första hand då effekten av sänkta grundvattennivåer i bebyggelseområden. Parallellt med geotekniska effekter av rubbade grundvattenförhållanden till följd av reducerad grundvattenbildning har vi den kvalitativa försämring av grundvattnet som ofta sker i bebyggelsepåverkade områden och som också innebär en begränsning i möjligheten att utnyttja grundvattnet för vattenförsörjning.

Det finns en serie tekniska förutsättningar som måste beaktas vid markexploatering och bebyggelse på olika nivåer och stadier i projekteringen. Av dessa har de geohydrologiska villkoren ofta blivit förbisedda. Men just förändringar av grundvattenbalansen medför lätt svårbedömda byggnadstekniska problem. När grundvattenytan sjunker kan i känsliga områden stora sättningar uppstå som ger skador på byggnader, ledningar, vägar m m som kan kosta miljontals kronor att åtgärda. Man kan i stor utsträckning förebygga sådana skador om man för planerad nybyggnation har kunskap och överblick över de konsekvenser olika byggnadstekniska ingrepp kan få på vattenbalansen.

Vi behöver också teknik för att kunna återställa en rubbad grundvattenbalans i speciellt sättningskänsliga områden. Den geohydrologiska forskning som nu bedrivs bl a i Sverige är också i stor utsträckning inriktad på sådana tekniska frågeställningar som berör kontroll och styrning av olika geohydrologiska förlopp t ex metodik för begränsning av grundvatteninläckning i bergtunnlar och kontrollerad dränering av grundvattnet via ledningsgravar och djupa schakter men också t ex teknik för djupinfiltration för att höja porvattrycket i djupare belägna grundvattenmagasin som "punkterats" av underjordsarbeten. Utveckling av geohydrologiska undersökningsmetoder för att bestämma samspelet mellan vattnet i jord och berg - hur de olika grundvattenmagasinen kommunicerar sinsemellan - men även hur infiltrations- och exfiltrationsprocesser påverkas av olika markingrepp är en viktig del av denna forskning.

2. GRUNDTVATTNETS BETYDELSE

Ett bibehållande av den naturliga grundvattennivån inom urbaniserade områden är av tekniskt och ekonomiskt intresse eftersom:

1. Grundvattnet har betydelse för vattenförsörjningen
2. En sänkning av grundvattennivån medför sättningar i kompressibla jordar
3. Sänkta grundvattenstånd kan påverka växtligheten lokalt och ge grundläggningsskador på träpålar och rustbäddar

Grundvattnets betydelse för vattenförsörjningen varierar i avsevärd grad inom Sverige. Allmänt kan man uttrycka det på följande sätt. Vi är inte någonstans inom vårt vattenrika land helt hänvisade till grundvattnet för kom-

munal vattenförsörjning. Vattenkrävande industrier kan utan några större problem lokaliseras till områden med riklig tillgång på vatten. Många tätorter - framför allt de större - använder nästan uteslutande ytvatten för sin vattenförsörjning och för sådana tätorter blir grundvattennivåns läge i de bebyggda områdena tämligen ointressant när det gäller vattenförsörjningen.

De flesta mindre och medelstora samhällena i Sverige använder emellertid i dag närbelägna grundvattenmagasin för sin vattenförsörjning ofta kompletterade med infiltrationsanläggningar. Övergång till ytvattentäkter innebär en investering som ofta är ganska stor. Detta gäller naturligtvis i första hand områden där ytvattentillgången är dålig, till exempel på Gotland och i stora delar av Skåne. Förutom anläggningar för råvattenbehandling måste man då också ofta investera i långa tunnlar eller ledningar för vattentransportering från områden med bättre tillgång på vatten. Övergång från grundvatten till ytvatten kan också innebära en sänkning av kvalitén på konsumtionsvattnet (exempel på motsatsen finns emellertid också: grundvattnet kan ha besvärande höga halter av kalk, järn etc.).

Grundvattnets betydelse för vattenförsörjningen får inte underskattas och de följder en urbanisering har måste noga studeras i de fall man för enskilt och kommunalt behov är beroende av grundvattentillgångarna inne i själva bebyggelseområdet. Problemet har emellertid varit föremål för stort intresse under lång tid och både forskare och politiker synes vara väl medvetna om dess betydelse. I denna uppsats skall därför inte vidare ordas om grundvattnets betydelse för vattenförsörjningen utan tyngdpunkten kommer i stället att läggas på grundvattennivåns betydelse ur byggnadsteknisk synpunkt.

En sänkning av grundvattnets trycknivå medför alltid sättningar. Detta är ett faktum, som gäller för alla slag av jordar. Verkligt besvärande blir emellertid sättningarna endast inom områden med kompressibel jord, speciellt i områden med lös lera, där sättningarna utbildas långsamt och pågår under många år.

Sveriges totala yta utgörs till mycket liten del av områden med lös lera. Sättningar i lös lera borde därför vara ett ganska litet problem. Ser man i stället till vilka områden som tätortsbebyggelsen är koncentrerad och hur de geologiska förhållandena ofta är inom våra stora tätorter blir emellertid bilden en helt annan. För de två största tätortsregionerna (Stockholm och

Göteborg) utgörs de lösa jordlagren till mycket betydande del av lös lera. Detta är fallet också för till exempel de mellansvenska jordbruksregionerna där flera stora tätorter finns. Inom dessa lerområden är ofta mäktigheten hos friktionsmaterialet under leran ringa. Detta gör att även måttliga grundvattenuttag eller reducerad grundvattenbildning kan ge upphov till betydande sänkningar av grundvattentrycket i de permeabla lagren som i sin tur kan medföra allvarliga sättningsproblem inom urbana områden. Problemet har under senare år blivit mycket uppmärksammat bland byggarna och flera forskare har varit inkopplade på att undersöka orsakssammanhangen och möjliga motåtgärder.

Ytterligare en effekt av förändringar i grundvattennivån kan vara värd att nämna, nämligen betydelsen för växtligheten, PALM (4). De flesta vanliga buskar och träd livnär sig av markvattnet i den omättade zonen över grundvattnet. Det för vegetationen tillgängliga vattnet i marken minskar på grund av ytdränering och tätning av ytor som minskar infiltrationen. Endast vissa växter, som anpassat sig till en hög grundvattennivå, riskerar att dö vid en sänkning av grundvattnet. Den lokala förändringen av naturen i samband med en urbanisering är emellertid omfattande och bara delvis beroende av förändrade grundvattenförhållanden. Allvarligare än en grundvattensänkning är i detta sammanhang kanske en försumpning, som naturligtvis också kan bli följden av en rubbad grundvattenbalans.

3. YTVATTENAVRINNING OCH GRUNDVATTENBILDNING I BEBYGGELSE-PÅVERKADE OMRÅDEN

I "naturliga avrinningsområden" präglas avrinningsförloppet av mänsklig påverkan i form av t ex skogsavverkning, uppodling av mark, utdikning och torrlägningsföretag som tenderar att minska landskapets avrinningsutjämnande effekt medan skogsplantering och framför allt eventuella vattenregleringar har en motsatt inverkan på avrinningsvariationerna. Om vi ser på ett urbaniserat område med tät bebyggelse så består en stor andel av markytan av hustak, asfalterade områden i form av gator, parkeringsplatser osv. Här kommer avrinningspåverkan att bli mycket mer markerad samtidigt som den naturliga grundvattenbildningen kraftigt minskar på grund av tätning av naturliga infiltrationsytor och ökad dränering av olika vattenmagasin.

För ytvattnet, som i ett tätortsområde avleds som s k dagvatten antingen tillsammans med spillvatten - kombinerat system - eller separat, blir avrinningsförloppet väsentligt snabbare jämfört med naturlig ytavrinning och med mer markerade flödestoppar. Detta ställer i sin tur stora krav på det ytvattenavledande ledningssystemets hydrauliska kapacitet. Om spill- och dagvatten avleds i skilda ledningssystem kan dagvattensystemet försees med utjämningsmagasin t ex som en sprängstensfyllning under en parkeringsyta eller brunnar för lokalt omhändertagande av takvatten som då kan utformas så att infiltration möjliggöres (s k perkolationsmagasin). På detta sätt vinner man både flödesutjämning och en förstärkning av grundvattenbildningen, CARLSTEDT (2).

Redan de hydrologiska förloppen i ett naturligt avrinningsområde är komplicerade. Ett bebyggelsepåverkat område där naturliga och styrda avrinningsförlopp på olika sätt samverkar är kanske ännu svårare att analysera. Fig 1 visar en starkt förenklad bild av vattenomsättningen i ett urbant område. En sådan schematisk framställning är uppbyggd av olika vattenmagasin som är förbundna med ett stort antal både reversibla och irreversibla transportmekanismer. Ytvattenavrinningen och motsvarande grundvattenomsättning har så många kopplingar att man inte kan behandla dessa två förlopp var och en för sig. Vill man analysera grundvattenförhållandena i ett område är det väsentligt att kartlägga ytvattenavledningen och vice versa. De geohydrologiska förhållandena kommer vid olika bebyggelse typer och systemlösningar på vatten- och avloppssidan att få varierande betydelse.

Hur inverkan sker av olika mark- och underjordsarbeten på ytavrinning och grundvattenomsättning är också markerat i fig 1.

Låt oss här kortfattat diskutera grundvattenbildningen i den typ av lerfyllda dalgångar där vi vanligen återfinner sättningsproblemen. I dessa lerområden har man ofta olika grundvattennivåer i olika jordlager. I leran finns en nivå i den sprickiga zonen nära markytan (torrskorpeleran). Denna nivå varierar i hög grad med nederbördsförhållandena. Grundvattentrycket i de övre delarna av leran följer i allmänhet också denna ytliga grundvattennivå.

Själva lerkörteln i dalgången brukar underlagras av friktionsjord som är många gånger mer permeabel än leran. Beroende på tillrinnings- och dräneringsförhållandena kan vattentrycket där ligga över eller under den ytliga

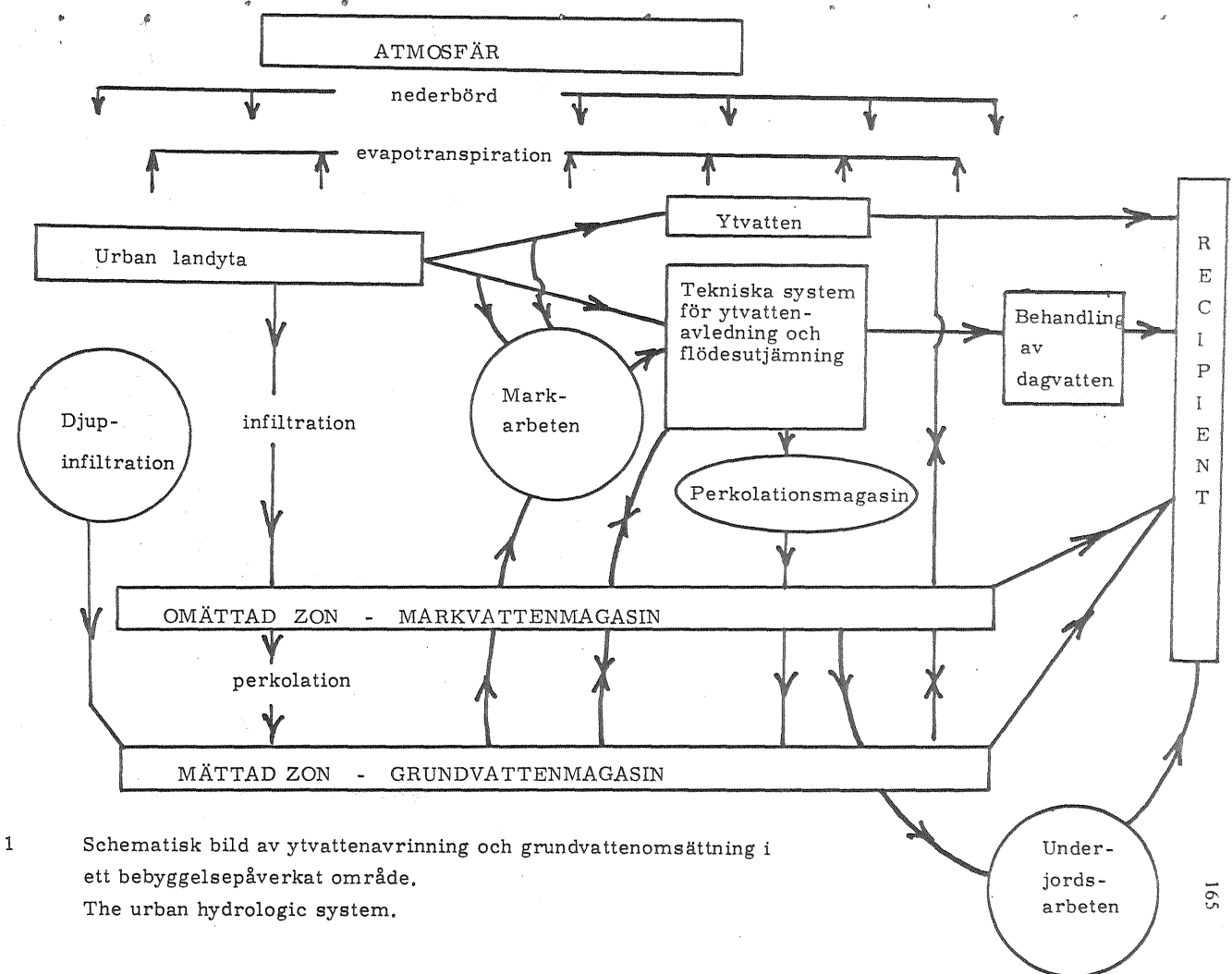


Fig 1

Schematisk bild av ytvattenavrinning och grundvattenomsättning i ett bebyggelsepåverkat område.
The urban hydrologic system.

grundvattennivån - i de lägre terrängavsnitten har vi ofta artesisikt grundvatten. Ibland har man lagerföljder av typ lera-friktionsjord-lera-friktionsjord osv och då kan mycket komplicerade tryckvariationer uppträda.

Dessa skillnader i grundvattentryck i olika jordlager är en helt naturlig företeelse. Fig 2 illustrerar grundvattenförhållandena i en lerfylld dal med ett tunt lager friktionsjord under leran. Man skulle kunna tro att man i tätorter där leran perforerats med pålar, markytan till stora delar asfalterats och där ledningar i jorden ligger tätt skulle få en annan bild. Det är naturligtvis så att en urbanisering i hög grad påverkar grundvattennivåerna men också i tätbebyggda områden med omfattande pålning förekommer olika grundvattennivåer. Exempel härpå är området kring Mariatorget i Stockholm, som uppvisar en mycket komplicerad grundvattenbild med stora variationer i grundvattentryck både horisontellt och vertikalt.

Grundvattenbalansen i friktionsjorden under leran bestäms till stor del av grundvattenförhållandena i angränsande grundvattenmagasin och eftersom berget i dalbottnen ofta är uppsprucket och permeabelt så blir kommunikationen med berggrundvattnet en väsentlig faktor vid analys av grundvattenomsättningen i dalformationen. Detta innebär att i det fall som fig 2 visar så infiltrerar regnvatten dels i randzonen mot omgivande bergsryggar (avrinnande ytvatten från berghällarna) där friktionsmaterial går i dagen och dels infiltrerar en hel del nederbörd i det ytliga uppspruckna berget, vatten som sedan

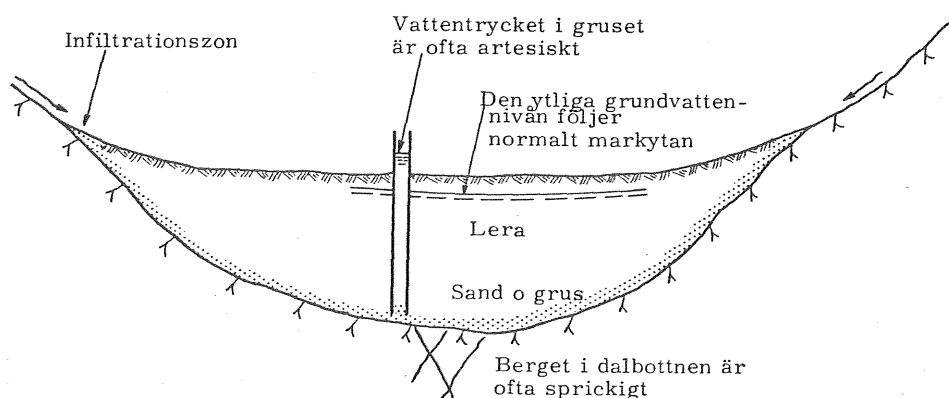


Fig 2 Grundvattenförhållanden i en lerfylld dal av den typ som är vanlig på svenska västkusten. Friktionsjordlagret under leran är oftast tunt och utgör genom den låga kompressibiliteten ett mycket litet vattenmagasin.
The ground water situation in a clay filled valley.

via spricksystemen i berget tillförs friktionsmaterialet. Vattnet strömmar sedan långsamt i friktionsjorden i dalens längdriktning.

Den vertikala perkolationen genom den täta leran ger ett mycket litet vattentillskott, vilket följande räkneexempel visar. Antag en lermäktighet på 10 meter och en permeabilitet i leran på 10^{-10} m/s (medelvärde för lera - vid vertikal strömning, vinkelrätt mot skikten skulle man eventuellt kunna ansätta ännu lägre permeabilitet). Antag vidare att grundvattennivån i friktionsjorden ligger fem meter lägre än den ytliga grundvattennivån i leran och att vattentrycket i leran varierar linjärt mellan dessa båda nivåer. Vi får då gradienten 0,5. Det vattenflöde som via leran tillförs friktionsjorden uppgår till ungefär 1,6 mm/år (sannolikt lägre eftersom Darcys lag har visat sig ge för höga flöden vid så små gradienter i lera).

Endast då grundvattnet har mycket lång väg att strömma i friktionsjorden och leran stor horisontell utbredning ger således den vertikala strömningen nämnvärt grundvattentillskott. I den kuperade terräng som är vanlig i Sverige är det omfattningen av verksamma infiltrationsytor och dräneringsvägarna i själva friktionsjorden som bestämmer grundvattenförhållandena.

4. ORSAKER TILL RUBBNINGAR I GRUNDVATTENBALANSEN

När ett jungfruligt område bebyggs påverkas grundvattenförhållandena. Detta är oundvikligt med den byggnadsteknik vi använder i dag. Lågt liggande lerdalar är, som vi framhållit tidigare, mycket känsliga för avsänkta grundvattenstånd. I en lerdal är leran i de högre liggande partierna i terrängen till följd av de naturliga grundvattenståndsvariationer som förekommer ofta överkonsoliderad och kan därför tåla viss grundvattensänkning. På lägre nivåer är leran lösare och mer känslig för en avsänkning av grundvattennivån. Det är därför väsentligt att fastställa ett områdes lägsta dräneringsnivå som är bestämd av hur ytvattenavledningen sker dels naturligt - diken, bäckar etc - och dels som en följd av bebyggelse - dagvattenledningar, ledningsgravar, schakter osv.

Grundvattensänkning som sker över lägsta dräneringsnivå i ett område kan orsakas av mark- och jordarbeten och förändrad ytvattenavledning t ex:

- Effektiv dagvattenavledning
Ledningar (spill- och dagvattenledningar) medför dels att regnvatten, som skulle kunna infiltrera ned i jorden och bilda grundvatten, direkt leds bort, dels att grundvatten läcker in i ledningarna; ledningarna verkar som dränering.
- Tätning av naturliga infiltrationsytor (asfalteringar och andra beläggningar).
Reducerar den naturliga grundvattenbildningen.
- Dränering av speciellt lågt liggande grundläggning
Djupa schakter medför under byggnadstiden ofta betydande avsänkningar av grundvattennivån, sänkningar som senare är svåra att återställa.
- Bortsprängning av dämmande grundvattentrösklar.
Detta kan ske vid ledningsläggning, vägbyggen eller i samband med grundläggning av byggnader.

Grundvattensänkning under lägsta dräneringsnivå i ett område kan ske till följd av underjordsarbeten och då i första hand av

- Läckande bergtunnlar

men också på grund av

- Stora uttag av grundvatten

Rent allmänt kan sägas att ett okontrollerat bortledande av grundvatten (bergtunnlar, dränerande ledningar) är allvarligare än en reducerad regnvatteninfiltration (tätning av infiltrationsområde). De största sänkningar av grundvattennivån som registrerats i urbana områden under senare år har orsakats av läckande bergtunnlar, WEDEL (8).

Läckande bergtunnlar har haft det goda med sig att de i hög grad riktat uppmärksamheten mot problemen med grundvattensänkning. En läckande bergtunnel kan medföra att grundvattentrycket i botten av ett magasin går ner till nolltryck. Spridningen åt sidorna är beroende av spricksystem och krosszoner i berget samt transmissiviteten i de permeabla lagren. Kraftig inverkan på grundvatten har uppmätts flera hundra meter från tunnlar.

Dränering via ledningsgravar sker på två sätt: dels verkar den permeabla fyllningen runt ledningarna dränerande, dels fungerar otäta ledningar som dräneringsrör.

Dräneringen via återfyllningsmaterialet i ledningsgraven torde ha mycket liten effekt. Detta har påvisats av CARLSTEDT (1). Carlstedt visar med ett räkneexempel att endast små vattenflöden strömmar i återfyllningen i en ledningsgrav. Antag att man har en ledningsgrav med lutningen 3 ‰, återfylld med sand med permeabiliteten $0,5 \times 10^{-3}$ m/s och att sandfyllningen har en effektiv tvärsnittsarea på 2 kvadratmeter. Med dessa siffror, som är helt normala och där permeabilitetsvärdet närmast ligger i överkant, fås att vattenflödet i fyllningen blir ca 11 l/tim. Detta innebär att flödet är så litet att det knappast har någon grundvattensänkande effekt.

Carlstedt behandlar i samma rapport (referens (1)) inläckningen i olika ledningar. Även om man antar att ledningarna är så tätä som föreskrivs av Svenska vatten- och avloppsverksföreningen är motsvarande inläckande vattenflöden betydligt större än i ovanstående räkneexempel. Mätningar av inläckande vattenflöden i spillvattenledningar har visat att den inläckande vattenmängden är av samma storleksordning som spillvattenflödet. PETTERSON och VOR (5) redovisar mätningar gjorda i Åkersberga, Vaxholms kommun. Dessa mätningar antyder att totalt under året är kanske endast hälften av vattenflödet i spillvattenledningarna spillvatten - resten är inläckande grundvatten. I ett examensarbete vid institutionen för VA-teknik vid CTH (7) redovisas mätningar i Nolered i Göteborg. Dessa mätningar gav till resultat att inläckaget under torrperioder uppgick till 1,4 gånger medelspillvattenavrinningen.

Avloppsledningar läcker alltså kraftigt och fungerar i princip som dräneringsledningar. Betydelsen av denna dränering beror dock i hög grad på ledningens läge. En ledning i ren lerjord har sannolikt ganska liten inverkan på grundvattennivån - avsänkningen blir helt lokal. Detta tyder både den ovan omnämnda undersökningen av Carlstedt på och en annan ännu ej redovisad undersökning i Göteborg. Ytterligare material erfordras dock innan man kan dra säkra slutsatser.

För ledningar som skär igenom permeabelt material är förhållandena annorlunda. Sådana ledningar har visat sig kunna influera grundvattennivån på långt avstånd. Särskilt allvarligt är det om ledningen ligger i randen till en lerfylld dal, dvs går i en naturlig infiltrationszon till området.

Djupa schakter inom urbaniserade områden har också visat sig kunna ge upphov till allvarliga grundvattensänkningar. Schakterna står visserligen öppna under en relativt begränsad tid men detta hindrar inte att grundvattennivån kan sänkas så mycket att allvarliga sättningsskador uppstår på omgivande bebyggelse. Orsaken är oftast den att man inte har vidtagit några åtgärder för att förhindra grundvatteninläckning. Det är billigast att pumpa bort vattnet inne i schakten och man har inte ansett att en kortare tids byggnadsarbeten skall ha någon större påverkan på grundvattenbalansen.

5. FÖLJDER AV EN GRUNDVATTENSÄNKNING

Som nämndes inledningsvis är den allvarligaste följdverkan av en grundvattensänkning i ett område med lös jord kraftiga sättningar. En grundvattensänkning har samma effekt som en belastning på markytan, vilket framgår av fig 3. När grundvattentrycket sänks ökar effektivtrycket mellan jordkornen och jorden komprimeras - en sättning uppstår.

En obetydlig grundvattensänkning innebär naturligtvis inte någon större fara. Grundvattennivån fluktuerar också under naturliga förhållanden. Även en lös lera är i högre eller mindre grad överkonsoliderad, dvs den kan tåla en viss tillskottslast utan att betydande sättningar uppkommer. Detta illustreras av fig 4, som visar en sättningskurva för lera. När man belastar en lera upp till det så kallade förkonsolideringstrycket så innebär emellertid varje ytterligare påförd belastning betydande sättningar. Om belastningen utgörs av uppfyllningar på markytan eller grundvattensänkning spelar ingen roll. I våra tätorter har vi oftast en kombination av bägge dessa belastningar på leran, TORSTENSSON (6).

Om förkonsolideringstrycket överskrids i ett lerområde uppstår ofta mycket besvärande sättningar. Detta har hänt inom stora områden i både Stockholm och Göteborg. Följderna har blivit sättningsskador på byggnader och stora sjunkningar inom väg- och gatumark. Eftersom ett flertal faktorer kan ha samverkat till en uppkommen sättning (i regel uppfyllningar i kombination med grundvattenavsänkning) så är detta också rent juridiskt en besvärlig fråga.

Problemet har accentuerats under senare år på grund av det stora antal bergtunnlar som drivits under de större tätorterna i Sverige (tunnlar för spillvatten och dagvatten, tele-, spårvägs- och sk gemensamhetstunnlar). Den avtappning av berggrundvattnet som dessa tunnlar kan medföra ger lätt en sådan tilläggs-

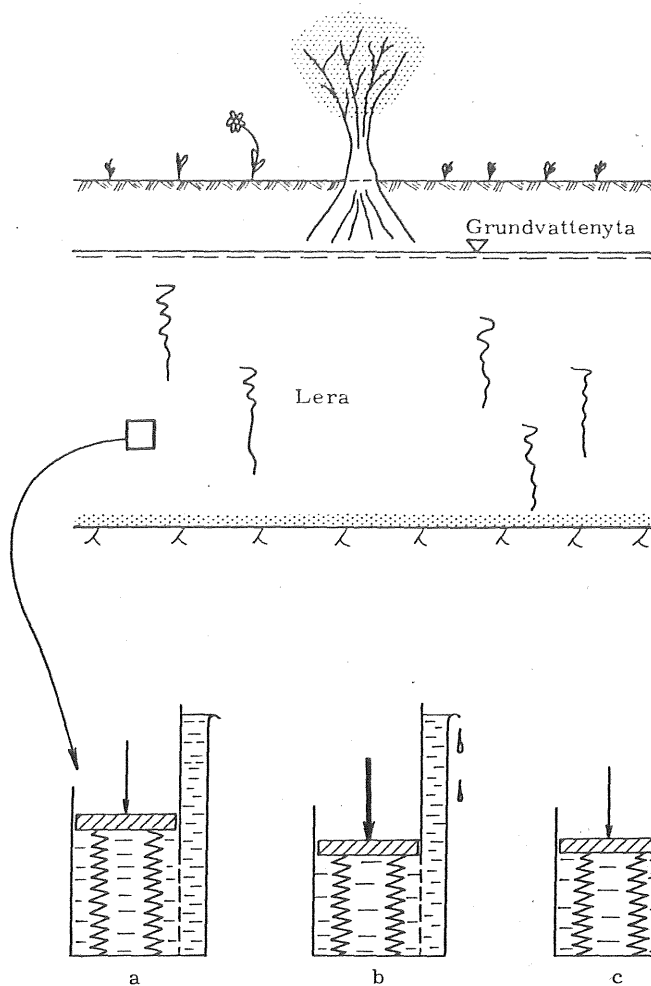


Fig 3

Konsolideringsförloppet i lera kan åskådliggöras med en reologisk modell, där lerskelettet är ersatt av fjädrar. Lasten bärs av fjädrarna och vattentrycket (fig a). Ökar lasten (fig b) så ökar först vattentrycket. Efterhand som vattnet strömmar ut genom de små hålen överförs lasten till fjädrarna under en samtidig sätttningsrörelse. Om vattentrycket minskar (fig c) fås också en sättning, eftersom tryckminskningen medför en motsvarande ökning av trycket i fjädrarna.

A reological model for the consolidation of clay.

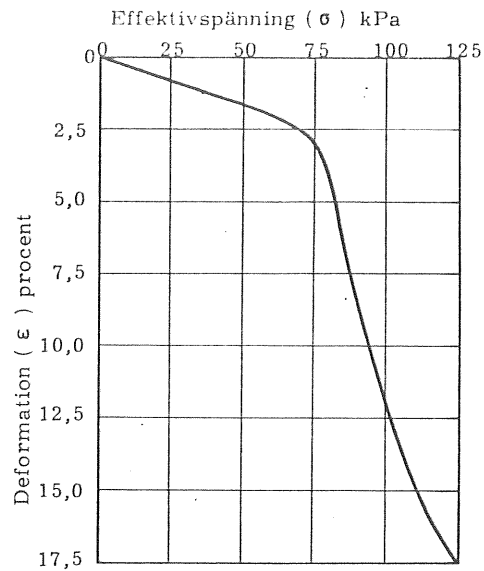


Fig 4 Kompressionsförsök på lera. Förkonsolideringstrycket ligger på ca 75 kPa. Kompressibiliteten är flera gånger större än under förkonsolideringstrycket. De små sättningar som uppkommer för laster lägre än förkonsolideringstrycket kan i allmänhet accepteras.
A clay compression test.

belastning på leran att förkonsolideringstrycket markant överskrids med stora tillskottssättningar som följd.

En annan konsekvens av grundvattensänkningar som ofta drabbar gammal bebyggelse har varit att träpålar kommit att med sina övre delar stå över grundvattenytan. När detta inträffar börjar träpålarna ruttna och kan inte längre ta den last de är avsedda för. Detta ger naturligtvis också upphov till allvarliga skador.

Exemplifieringar

Marksättningar i bostadsområde i Göteborg

För att visa hur komplicerat det kan vara att utreda orsakssammanhangen då marksättning konstaterats låt oss redogöra kortfattat för ett problem som

var aktuellt i Göteborg för något år sedan.

Området är en lerfylld dalgång som i nordost mynnar i Göta Älvdalen. Dalgången avgränsas av höjdparter huvudsakligen bestående av kalt berg i väster och berggrundsbetingade höjdområden i söder och öster som täcks av ett tunt moränlager. Som vanligt är vid den här typen av geologisk formation så finns ett lager av friktionsmaterial med varierande tjocklek under leran i dalbotten. Grundvattenbildningen sker till stor del genom infiltration i de kringliggande bergspartiernas spricksystem som i sin tur står i kontakt med friktionslagren i dalgången. Avrinnande ytvatten infiltrerar också i de randzoner av friktionsmaterial som finns runt dalbäckenet utmed bergryggarna.

Grundvattenmagasinet i friktionslagret mellan den täta lerkörteln i dalen och dalbotten är relativt litet och redan en måttlig avtappning kan ge markerade förändringar i trycknivån.

Dalgången började bebyggas i slutet av 60-talet. Något år efter byggnationen påbörjats observerades sättningar i markplanet som efter hand uppgick till 10 å 15 cm, lokalt dock närmare en halvmeter. Uppfyllningar som utlagts inom området varierar i tjocklek och kan på vissa ställen uppgå till ungefär 2 m. Sättningar på upp till 15 cm kan anses vara normalt för ett exploateringsområde med den geologiska uppbyggnad som det här är fråga om och med tanke på de uppfyllningar som gjorts.

De sättningar som registrerats inom vissa partier av området är således ovanligt stora, vilket skulle tyda på annan inverkan på grundvattenbalansen än ytliga jordarbeten och dräneringar. En avloppstunnel väster om området ligger 300-700 m från dalgången. Tunneln passerar en mer markerad svaghetszon i berget. På de drygt 7 km av tunnelsträckningen som skulle kunna influera det aktuella områdets grundvattenbalans har inläckningen till tunneln uppmätts till i genomsnitt ungefär 1 l/s och km tunnel. Där tunneln passerar den nämnda svaghetszonen är inläckningen - trots omfattande injekteringar - avsevärt större och uppgår lokalt till mellan 1 och 2 l/s. Avståndet från denna punkt till det område av dalgången där de mer omfattande sättningarna observerats är drygt 600 m vilket är större än vad man tidigare erfarit vara en tunnels maximala influensradie vad gäller påverkan på grundvattenstånd. Fig 5 visar en översiktlig skiss över området.

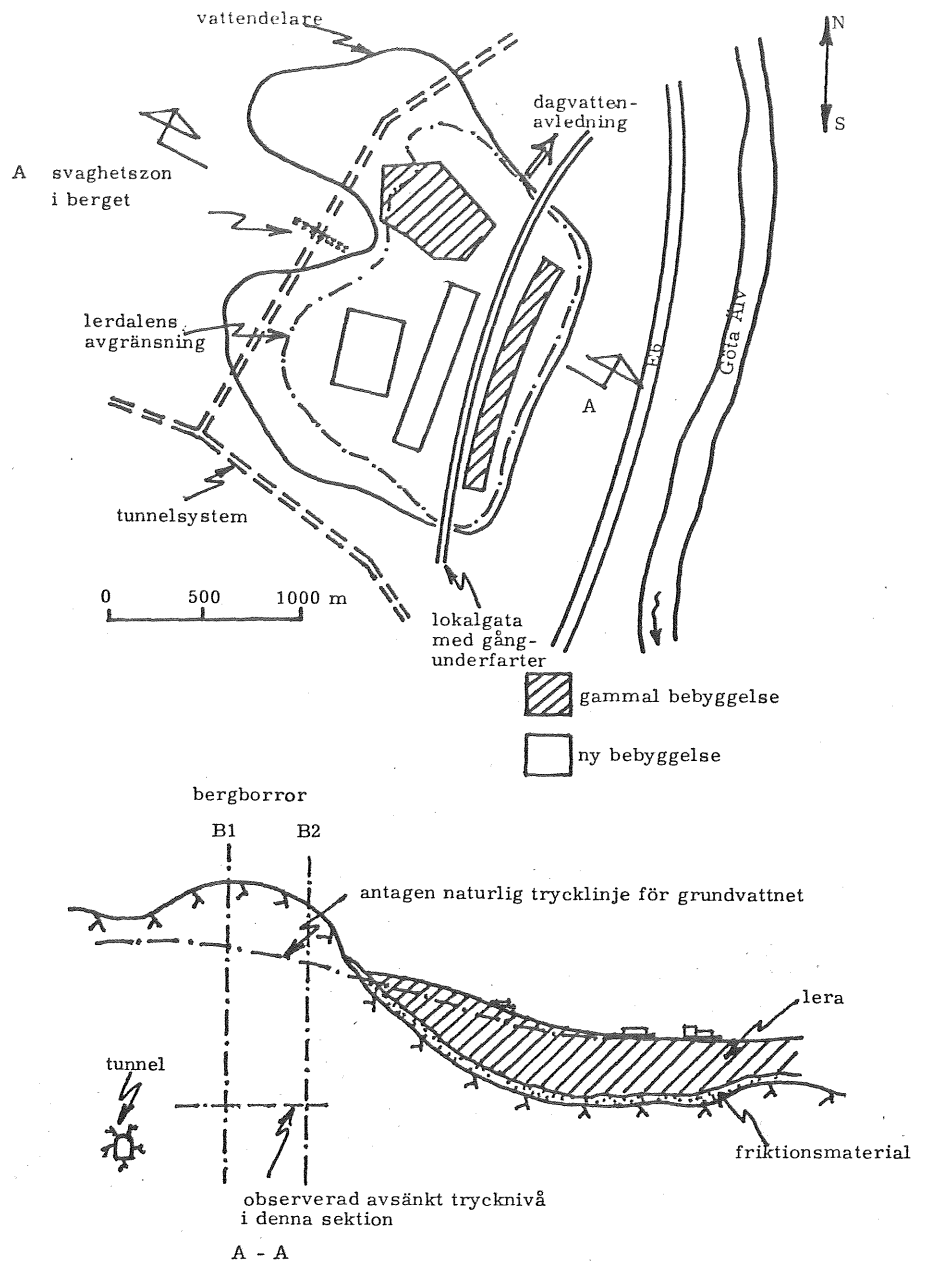


Fig. 5 Ett område med konstaterad marksättning i Göteborg
Observed ground subsidence in an urban area.

För att undersöka grundvattenförhållandena i området och dräneringsriktningarna har ett antal grundvattenståndsror satts i området. Rördrivningen utfördes så att 90 mm stålrör drevs till fast botten (i allmänhet lika med block eller berg). I anslutning till området fanns dessutom rör som neddrivits för grundvattenobservationer i samband med tunneldrivningen. Grundvattenståndsavsänkningar på 4-5 m är vanliga i området - i en mer markerad avsänkingszon in mot berget i nordväst har avsänkningen uppgått till ca 13 m jämfört med de grundvattenstånd som uppmäts före bebyggelse och tunneldrivning.

För att kunna klargöra vilka faktorer som bidragit till observerade sättningar behöver förslagsvis följande utredningar göras:

1. Översiktlig geohydrologisk beskrivning av området - sammanställning av geotekniskt undersökningsmaterial och i förekommande fall geohydrologisk kartering av bergtunnlar
2. Utredning av markanvändning i området och inverkan på områdets yt- och djupdränering
3. Brunnsinventering (vattentäkter) och vattenståndsobservationer i grävda och borrarade brunnar
4. Grundvattenutredning för att klarlägga
 - a. naturliga avrinningsförhållanden - influensområden
olika mark- och underjordsarbeten
 - b. infiltrationsvägar
 - c. magasinsförhållanden
 - d. budgetering av grundvattenbildning
 - e. vattenkvalitetsförhållanden
5. Dokumentation av skador på byggnader

Om markarbeten i samband med bebyggelse eller underjordsarbeten kan tänkas beröra ett sättningskänsligt område bör utredningar av det här slaget ingå i förprojektering så att underlag för fastläggande av täthetskrav på tunnlar, lägningsmetoder för ledningar osv erhålles.

Låt oss kortfattat försöka beskriva den naturliga grundvattenbalansen i området. Med hjälp av topografisk karta uppskattas avrinningsområdets storlek till ungefär $2,5 \text{ km}^2$. Om årsmedelnederbörden är 600 mm och vi antar att infiltrationskoefficienten i medeltal för området är 0,2 (själva lerdalen har sannolikt lägre värde men kranspartier av relativt uppsprucket berg har högre) så ger detta en grundvattenbildning i medeltal under året på ca 10 l/s. Den naturliga trycknivån för grundvattnet är då som skisserats i fig 5. Lägre

partier i terrängen utgör i princip exfiltrationsområde som ger en mycket långsam transport av grundvatten från friktionslagret upp genom lerkörteln varvid dock huvudparten av grundvattenavtappningen sker genom friktionslagret ut till älven. Trycknivån i kringliggande berg ligger normalt relativt högt eftersom dalsidorna tätar till och "dämmer upp" berggrundvattnet. Tidigare förekom vissa sankta markpartier nere i dalen som stöder denna bild av den naturliga grundvattenomsättningen.

Efter byggnation har avrinningsförhållandena ändrats avsevärt. Stora ytor har asfalterats och husen har dränerats. Avskärande ledningar utmed bergssidorna förekommer. Gångtunnlar under befintlig lokalgata är lågpunkter varifrån dräneringsvatten pumpas. Ombyggnad av vatten- och avloppssystemet pågår med separering av dag- och spillvatten. Det uppsamlade dagvattnet leds via en kulvert ut i älven. Torrvädersavrinningen i dagvattenkulverten har vid ett tillfälle observerats till ungefär 10 l/s, som huvudsakligen representerar bortdränerat grundvatten.

För avloppstunneln har inläckningen på den aktuella sträckan uppmätts till ungefär 7 l/s där en väsentlig del kommer från tunnelns passage genom svaghetszonen i berget. Hur mycket av den totala inläckningen som dräneras från den aktuella dalsänkan är svårt att avgöra. För att klargöra vilka största tillåtna läckvattenmängder som gällt under tunneldrivningen, hur läckvattnet uppsamlats och mätts måste man ta del av gällande arbetshandlingar för tunneldrivningen. På samma sätt är det väsentligt för att få en fullständig bild av förhållandena i ett område att undersöka hur ledningar är lagda och djupdränerade konstarbeten grundlagda, hur schaktningar och utfyllnader skett - om t ex organiska ytlager borttagits före fyllning eller om delvis tjälade fyllningsmassor utlagts under köldperioder osv.

I det här refererade fallet har utförda utredningar visat att dalgången lider viss förlust av grundvatten till följd av inläckning till avloppstunneln. Två borrhål öster om tunneln satta i den nämnda svaghetszonen, se fig 5, visar god permeabilitet hos berget (snabb avsänkning av vattennivån i hålen efter påfyllning). Observerade vattenståndsvariationer i borrhålen tyder på likformig, hög vattenomsläpplighet i berget på tunnelnivån. De avsänkta vattenstånden i borrhålen är lägre än lägsta dräneringsnivå i dalgången vilket är bevis på tunnelns dränerande effekt. Direkt infiltration i berget med utnyttjande av den vattenomsläppliga bergzonen är en tänkbar metod att återställa grundvattentrycket

i berget och således också i de delar av dalgången som drabbats av stora grundvattensänkningar.

6. ÅTGÄRDER MOT GRUNDTVATTENSÄNKNING

Åtgärder mot grundvattensänkning kan indelas i

- förebyggande åtgärder
- åtgärder mot redan inträffade grundvattensänkningar

Det är naturligtvis ur flera synpunkter lämpligt att bygga så att man undviker besvärande sänkningar av grundvattennivån. Detta är till mycket stor del en fråga om planering. Det gäller att inte täta (exempelvis asfaltera) infiltrationsområden: regnvattnet måste ha möjlighet att rinna ned i sina ofta mycket begränsade infiltrationsområden och bilda grundvatten. Tunnlar och ledningar skall ej placeras i sådana lägen att de ger upphov till grundvattensänkningar.

Fastställer man lokala bestämmelser om lägsta grundvattennivå i sättningsbenägna, lågt liggande lerområden innebär detta också ett kontroll- och övervakningsproblem. Mark- och underjordsarbeten fördyras genom att andra arbets- och grundläggningsmetoder måste tillämpas. Man har därför i Sverige inte tillgripit sådana bestämmelser. En annan fråga berör det kvalitativa skyddet av grundvattnet i urbana områden som också kan regleras med hjälp av lokala förordningar och bestämmelser.

De ovannämnda önskemålen beträffande en mer vidsynt planering med beaktande av geohydrologiska förhållanden kan naturligtvis inte alltid tillgodoses. Det finns emellertid mer man kan göra. Avloppsledningar i jord behöver inte fungera som dräneringsledningar. Man kan mycket väl tänka sig att utforma spillvattenledningar (självfallsledningar) av samma kvalitet som tryckledningar. Man vinner då en avsevärt reducerad avloppsvattenföring genom att inläckning undviks. Samtidigt finns det många tekniskt-ekonomiskt intressanta alternativ för dagvattenhanteringen: via kombinerade perkolations- och uppehållsmagasin kan dagvattnet ledas till naturliga diken och vattendrag i större utsträckning än vad som nu sker i våra urbana områden (Jfr Carlstedts uppsats till detta symposium). Sammantaget ger dessa åtgärder inte bara möjlighet att bibehålla den naturliga grundvattennivån och därmed minskade sättningar utan också mindre flöden till reningsverken och därmed minskad förorening av recipienten.

Bergtunnlar och djupa schakter kommer även med en god planering att behöva placeras i geohydrologiskt ogynnsamma lägen ur grundvattensynpunkt. Här gäller det att redan innan en grundvattensänkning inträffat sätta in kraftfulla åtgärder för att förhindra störningar i grundvattenbalansen. Tunnlar kan byggas mycket täta om man går in för detta från början, dvs inte bygger tunnlar som man tätar utan bygger "täta tunnlar". Det är emellertid dyrt att bygga tillräckligt täta tunnlar inom känsliga områden (dålig bergkvalitet) och därför ligger i begreppet tunneltätning att man skall dimensionera åtgärderna efter behoven. En noggrann analys av grundvattnets strömningsvägar i jord och berg och vilka konsekvenser en grundvattensänkning kan föra med sig skall därför göras före tunnelbygget.

Redan inträffade grundvattensänkningar är ofta svåra att åtgärda. Den vanliga metoden är djupinfiltration av vatten. Redan metoden i sig rymmer många svårigheter, t ex igensättning av brunnarna. Det har dessutom visat sig att det är mycket svårt att placera brunnarna på ett sådant sätt att erhållen infiltrationskapacitet räcker för att motverka exempelvis en läckande bergtunnel. För att man skall få tillräcklig effekt krävs långtgående tätning av tunneln samtidigt som man infiltrerar. För närvarande pågår både i Stockholm och Göteborg en del försök med djupinfiltration, CARLSSON (3).

Skadeförebyggande åtgärder

När det gäller att förebygga skador som uppstår i samband med sättningar orsakade av en grundvattensänkning så är den viktigaste metoden i dag pålning. Med modern pålningsteknik kan man förhindra att byggnadsverk av olika slag får sättningsskador. Man har emellertid svårt att förhindra att markytan sjunker och därigenom får man skador när till byggnaden anslutande delar sjunker. Enbart pålning är således ingen tillräcklig metod i skadeförebyggande syfte. Alternativa metoder är önskvärda och här finns i dag ett stort fält öppet för byggnadstekniskt inriktad, geohydrologisk forskning.

När markytan inom ett helt område sjunker till följd av en uppkommen grundvattensänkning blir ofta sättningarna relativt jämna. I stället för att placera byggnaderna på pålar är det då mera tilltalande att göra grundläggningen flexibel så att man kan justera för eventuella snedsättningar medan byggnaderna i övrigt följer med markytans sjunkning. Denna metod har prövats i viss utsträckning när det gäller småhus men en hel del utvecklingsarbete återstår ännu.

Förstärkning av leran är en annan metod som är föremål för forskning i dag. Man kan dels göra en kemisk förstärkning av jorden, dels ta ut sättningarna i förväg genom att avvattna leran exempelvis med hjälp av elektroosmos.

Den för närvarande enklaste åtgärden när det gäller att förebygga skador är emellertid en förnuftig planering. Man skall lägga sättningskänsliga byggnader inom områden med fast mark. Sättningskänsliga lerområden bör i stället utnyttjas för parker, fotbollsplaner osv. Med de byggnadstekniska kunskaper vi har i dag är det bättre att glesa ut bebyggelsen och på så sätt kunna undvika sättningskänsliga områden än att till varje pris bygga nära tätortskärnorna och därigenom öka risken för omfattande sättnings-skador.

Sanering av gamla bostadsområden

I samband med sanering och upprustning av gamla bostadsområden så är det vanligt att upprätta en restaureringsplan för det befintliga VA-ledningssystemet. Det rör sig vanligen om en separering av dag- och spillvattenavledningen men andra åtgärder t ex lokalt omhändertagande av dagvatten, byggande av utjämnings- och perkolationsmagasin kan bli aktuella. I ett saneringsområde i Haga, Göteborg, för att ta ett exempel, är husen grundlagda på ett lerlager som varierar i tjocklek från 10 m till 50 m. Grundkonstruktionen är för trä- och skandshövdingehus nästan uteslutande rustbäddar som ligger på ett djup mellan 1,2 - 1,7 m under mark (ök träkonstruktionen). De stenhus som finns är grundlagda med kohesionspålning under rustbädd. Det har konstaterats att grundvattensänkning skett sedan längre tid tillbaka och bl a rustbäddar har skadats genom dränering av det övre marklagret. För att kunna bevara en del av den befintliga bebyggelsen, varvid krävs bl a att kunna grundlägga nybyggda hus i anslutning till gamla hus, så måste grundvattenproblemen lösas. Det är här som lokalt omhändertagande av dagvatten - kombinerade perkolations- och utjämningsmagasin - kan ge möjlighet att åtminstone lokalt (kvarterslösningar) skydda rustbäddar och pålhuvuden.

SUMMARY

The urbanization process is proceeding rapidly in many parts of the world. This creates a series of problems from a hydrologic and geohydrologic point of view which the city planners and engineers have to deal with. Lowering of

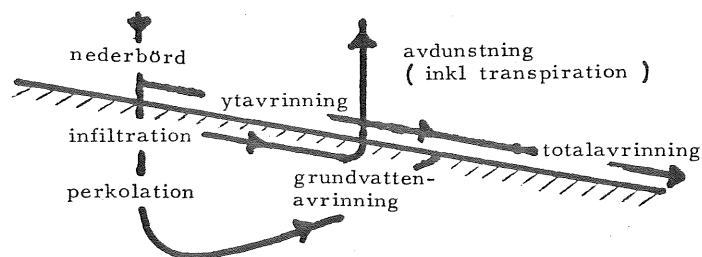
the groundwater table is often observed as a consequence of urbanization and for areas with compressible soils this is very often a serious problem. In this paper we have discussed some geotechnical aspects of a disrupted groundwater balance in a typical clay valley often found in Scandinavia.

LITTERATUR

- (1) Carlstedt, B: Hydrologisk modell - dränering genom ledningsgravar. Rapport inlämnad till BFR (under tryckning), 1974.
- (2) Carlstedt, B: Urban dagvattenavledning på nytt sätt (detta symposium).
- (3) Carlsson, L.: Infiltration of water into confined aquifers to prevent groundwater lowering (detta symposium).
- (4) Palm, R: Grundvattensänkning farlig för vegetationen? Byggmästaren 8, 1972.
- (5) Peterson, G och Vor, Z: Täta avloppsledningar, Stadsbyggnad 11, 1974.
- (6) Torstensson, B-A: Sättningsproblem i lerområden (detta symposium).
- (7) Inst. för VA-teknik, CTH: Studium av inläckage i spillvattenledning tillhörande duplikatsystem (Nolered-Röd), Göteborgs stad. Publ. C 68:1, 1968.

Falkenmark: Cederwalls systembild av ytvattenavrinning och grundvattenomsättning saknar konnektion mellan markvattenmagasin och avdunstning. Detta ger anledning till kommentar beträffande synen på infiltrationsförloppet - här råder skillnad mellan teknisk och hydrologisk terminologi. Vad teknikerna kallar infiltration motsvarar vad hydrologerna kallar dels infiltration, dels perkolation.

Hydrologernas principiella syn:



Leif Carlsson (inst. för vattenförsörjnings- och avloppsteknik,
Chalmers Tekniska Högskola)

DJUPINFILTRATION I SLUTNA AKVIFERER

(Infiltration in confined aquifers)

Sammandrag

Olika parametrars inverkan på tryckförändringsförloppet vid djupinfiltration i slutna akviferer har teoretiskt behandlats, varvid såväl inverkan av begränsningar av akvifer som läckage till över- eller underlagande lågpermeabla lager beaktats. Genomförda djupinfiltrationsförsök inom ett område vid Angered, Göteborg, visar snabba tryckförändringsförlopp i akviferen samt påverkan även i berg. Ett med tiden minskat vattentryck under infiltrationen sätts i samband med igensättningsfenomen i infiltrationsbrunnen.

Inledning

Infiltration av vatten i jord- och berg utgör en naturlig process i det hydrologiska kretsloppet. Denna naturliga infiltration kan genom olika ingrepp förstärkas. Bortsett från den typ av infiltration som kan betecknas som bevattning dvs en vattentillförsel till mark för växtlighetens behov kan översiktligt följande indelning göras av begreppet "konstgjord infiltration" med avseende på ändamål med densamma:

- o Infiltration för förstärkning av en vattentillgång avsedd att utnyttjas för vattenförsörjningsändamål.
- o Infiltration med avsikt att reglera ett vattentryck i grunden.
- o Infiltration som geohydrologisk undersökningsmetod.
- o Infiltration för kvittblivning av vatten.

Infiltration kan utföras dels som djupinfiltration dels som ytinfiltration. Utförandet beror dels av ändamålet med infiltrationen, dels av de geologiska förutsättningarna vid platsen för infiltrationen. Infiltration av vatten med avsikt att reglera ett vattentryck i grunden utnyttjas för att

- o motverka spridning av föroreningar som tillförts grundvattnet,
- o motverka inträngning av ej önskvärt vatten, exempelvis saltvatten i en akvifer,
- o bibehålla ett vattentryck i grunden för att motverka sättningar,
- o bibehålla en vattennivå för att ej orsaka sinade vattentäcker eller minskad växtlighet.

Effekten av en infiltration mätt som vattentrycksförhöjning och areell påverkan beror av de geohydrologiska förhållandena inom infiltrationsområdet. Infiltration i ett slutet grundvattenmagasin dvs vattenförande lager belägna under eller mellan lager med lägre permeabilitet, ger en större areell påverkan än motsvarande infiltration i ett öppet grundvattenmagasin. Detta sammanhänger med den avsevärt lägre magasinsskoefficienten som föreligger vid slutna grundvattenmagasin jämfört med öppna. Begreppet djupinfiltration innebär infiltration av vatten genom brunnar ned i ett slutet grundvattenmagasin. Infiltrationen utföres antingen med konstant infiltrationskapacitet eller med konstant vattentryck i infiltrationsbrunnen. Vid djupinfiltration tillförs vatten direkt det vattenledande friktionslagret (akviferen). Den horisontella vattentransporten ut från infiltrationsbrunnen sker i friktionslagret på grund av detta lagers högre permeabilitet jämfört med överlagrande lerlager.

Vid utvärdering av resultatet från djupinfiltration genom brunnar måste beaktas att de vattentrycksförändringar som registreras i såväl akvifer som över- eller underlagrande lågpermeabla lager beror av ett stort antal faktorer som översiktligt kan sammanfattas enligt följande:

- akviferens transmissivitet och magasinsskoefficient
- akviferens begränsningar i horisontell led
- grundvattenmagasinets eventuella övergång från öppet till slutet förhållande
- läckage av vatten från akviferen till över- och underlagrande lågpermeabla lager
- förändring av akviferens transmissivitet och magasinsskoefficient samt
- igensättning av infiltrationsbrunnen på grund av det infiltrerade vattnets beskaffenhet.

Infiltrationens beroende av akviferens transmissivitet, magasinsskoefficient och begränsningar i horisontell led.

Vatten som infiltreras med konstant kapacitet Q i en akvifer orsakar en vattentrycksförändring s i akviferen på ett avstånd r från infiltrationsbrunnen vid tiden t efter infiltrationsstart, se fig. 1. Genom att betrakta djupinfiltration av vatten genom brunnar som det motsatta förhållandet till bortpumpning av vatten via brunnar kan de teorier som gäller för provpumpning tillämpas. Med antagande om att inga begränsningar av akviferen förekommer i horisontell led, att inget vatten bortgår via läckage till över- eller underlagrande

formationer samt att de geohydrologiska parametrarna T och S i akviferen (transmissivitet och magasin-koefficient) ej förändras med tid eller avstånd kan förändringen av vattentrycket s i akviferen tecknas

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \cdot W(u) \quad (1)$$

$$u = \frac{r^2 \cdot S}{4Tt} \quad (2)$$

där $W(u)$ benämns Theis brunnfunktion och tecknas

$$W(u) = \int_u^\infty \frac{e^{-u}}{u} du \quad (3)$$

Sambandet mellan $W(u)$ och $\frac{1}{u}$ (Theis kurva) framgår av fig. 4. Sambandet mellan tryckförändringen s och $\frac{t}{r^2}$ följer denna kurva. Genom superponering av kurvor visande de båda nämnda sambanden kan transmissiviteten T och magasin-koefficienten S beräknas [1, 2].

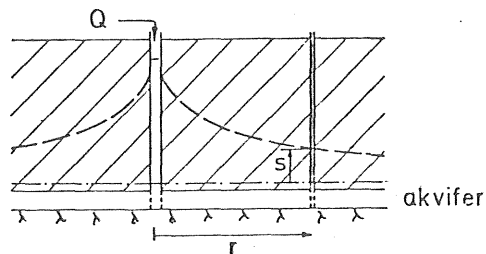
För värden på $u < 0,01$ dvs för korta avstånd mellan infiltrationsbrunn och observationsbrunn eller långa infiltrationstider kan ekv (1) uttryckas i en konvergent serie där de senare termerna i serieutvecklingen försummas och ekv (1) tecknas [3].

$$s = \frac{Q}{4\pi T} (-0,5722 - \ln u) = 0,183 \frac{Q}{T} \log \left(\frac{2,25 T \cdot t}{r^2 \cdot S} \right) \quad (4)$$

Sambandet mellan vattentrycksförändringen s och tid efter infiltrationsstart ger i lin-log papper en rät linje enligt fig. 2. Tryckförändringen per tidsdekad Δs och tiden t_0 , dvs vid tryckförändringen $s = 0$ enligt den räta linjen ger följande ekvationer för beräkning av T och S

Fig. 1

Tryckförändring s på avståndet r från infiltrationsbrunn i en sluten akvifer vid konstant infiltrationskapacitet. (Change in the piezometric head in a confined aquifer)



$$T = 0,183 \frac{Q}{\Delta s} \quad (5)$$

$$S = \frac{135 \cdot T \cdot t_0}{r^2} \quad (6)$$

där t_0 anges i min och T i m^2/sek .

Utnyttjas r som variabel istället för t erhålles följande uttryck för T och

$$T = 0,366 \frac{Q}{\Delta s} \quad (7)$$

$$S = \frac{135 \cdot T \cdot t}{r_0^2} \quad (8)$$

där r_0 anger det avstånd som enligt det rätlinjiga sambandet vid tiden t har vattentrycksförändringen noll i akviferen, se fig. 3

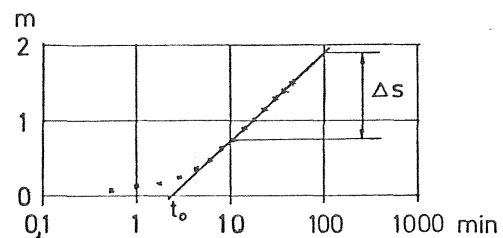
Storleken av det område som påverkas av infiltrationen vid olika tidpunkter efter infiltrationsstarten kan enligt ekv (8) approximativt anges enligt följande:

$$r_0 = 11,6 \sqrt{\frac{T \cdot t}{S}} \quad (9)$$

Fig. 2

Tryckförändring som funktion av tid vid konstant infiltrationskapacitet (Jacobs metod).

(Change in piezometric head with time in a confined aquifer according to Jacob's method).



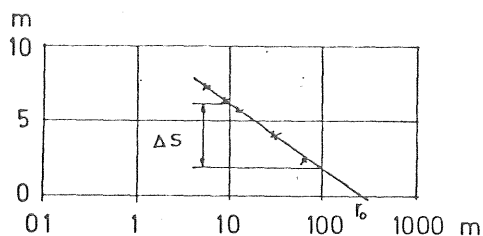


Fig. 3. Tryckförändring som funktion av avstånd från infiltrationsbrunn vid konstant infiltrationskapacitet (Jacobs metod).
(Change in piezometric head with distance in a confined aquifer according to Jacob's method).

Approximationen gäller under angivna antaganden och visar att storleken av området ökar med ökande transmissivitet och minskande magasinskoefficient. För öppna grundvattenmagasin kan översiktligt magasinskoefficienten anges till $2 \cdot 10^{-1} - 10^{-2}$ medan i slutna grundvattenmagasin motsvarande värde kan anges till ca $10^{-3} - 10^{-5}$. Ett grundvattenmagasin med given transmissivitet påverkas således inom ett 10–1000 gånger större område under slutet än under öppet tillstånd. Motsvarande förhållande gäller även för påverkan vid en avsänkning. Sammanfattningsvis kan således sägas att vid frånvaro av begränsning och läckage är det påverkade områdets storlek i första hand beroende av förhållandet mellan akviferens transmissivitet och magasinskoefficient (dvs dess hydrauliska diffusivitet) medan tryckförändringens storlek i första hand beror av akviferens transmissivitet (ekv (4)). Dessutom inverkar givetvis såväl infiltrationskapacitet som infiltrationstid.

Naturliga förhållanden och speciellt förhållanden i glacialsculpterade områden medför att förekommande akviferer har begränsningar i horisontell led (hydrauliska gränser). Dessa gränser innebär en radikal förändring av akviferens transmissivitet i horisontell led. Denna förändring kan vara mer eller mindre påtaglig och betingas av förekomster antingen av tätande eller vattentillförande gränser. I det förnämnda fallet säges den hydrauliska gränsen vara negativ i det senare fallet positiv. Vid djupinfiltration i slutna akviferer är det i första hand de negativa hydrauliska gränserna som inverkar på tryckförändringsförloppet i akviferen.

Teoretiskt kan effekten av hydrauliska gränser behandlas genom att imaginära spegelbrunnar införs på samma avstånd från den hydrauliska gränsen som infiltrationsbrunnen för att uppfylla randvillkoren.

Vattentrycksförändringen i akviferen kan vid närvaro av en negativ hydraulisk gräns beskrivas enligt följande [4] :

$$S = \frac{Q}{4\pi T} W(u) + W(\beta^2 u) = \frac{Q}{4\pi T} W_B(u, \beta) \quad (10)$$

$$\text{där} \quad \beta = \frac{r_1}{r_2} \quad (11)$$

r_1 = observationsbrunnens avstånd till den imaginära spegelbrunnen.

Tryckförändringsförloppet i en akvifer med två parallella täta begränsningar kan behandlas genom införande av spegelbrunnar. I detta fall blir dock antalet brunnar oändligt [2, 5]. Gustafson [6] har teoretiskt behandlat provpumpning i åsakviferer med två parallella negativa gränser och visat att för avstånd mellan observationsbrunn och infiltrationsbrunn (provpumpningsbrunn) större än det kortaste avståndet mellan infiltrationsbrunnen och någon av gränserna kan vattentrycksförloppet återges enligt följande:

$$s = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{\pi}} \cdot \frac{Q \cdot x}{T \cdot B} D(w) \quad (12)$$

$$w = \frac{x^2 \cdot S}{4 T \cdot t} \quad (13)$$

B = avståndet mellan de parallella gränserna

x = avstånd parallellt med gränserna från infiltrationsbrunn till observationsbrunn.

Dränfunktionen $D(w)$ har enligt Gustafson [6] följande uttryck:

$$D(w) = \frac{e^{-w}}{\sqrt{w}} - \sqrt{\pi} + 2 \int_0^{\sqrt{w}} e^{-x^2} dx \quad (14)$$

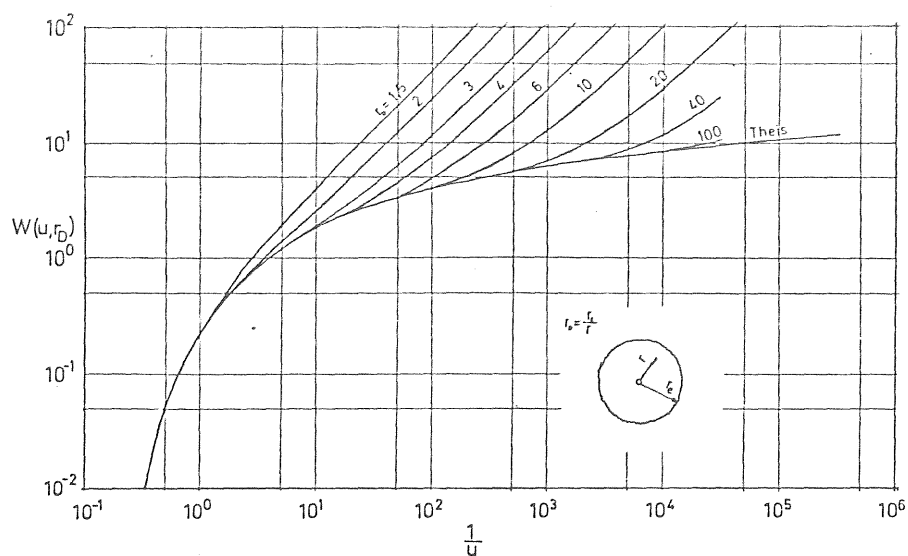


Fig. 4. Sambandet mellan $W(u, r_D)$ och $\frac{1}{u}$ för en akvifer med tät cirkulär begränsning (efter Witherspoon et al [7]).

($W(u, r_D)$ versus $\frac{1}{u}$ for limited aquifer with circular boundary (after Witherspoon et al [7]).)

Den mest begränsade akviferen kan sägas vara den cirkulärt begränsade. Witherspoon et al [7] har teoretiskt angivit tryckförändringsförloppet i en sådan akvifer. Avvikelsen från Theis kurva för olika värden på förhållandet mellan avståndet från infiltrationsbrunn till gräns och avståndet från infiltrationsbrunn till observationsbrunn framgår av fig. 4. Teoretiskt torde det snabbaste tryckförändringsförloppet inträffa i denna typ av begränsade akviferer. I geologiska områden med mellan berg begränsade lerbassänger är denna typ av akviferer relativt vanlig. Speciellt inom Göteborgsområdet där även friktionslagret under leran närmast berget endast är sammanhängande inom begränsade delar, torde dessa starkt begränsade akviferer förekomma. Detta innebär begränsad areell påverkan vid infiltration men snabbt tryckförändringsförlopp.

Infiltrationens inverkan på vattentrycksförhållandena i
över- och underlagrande lågpermeabla lager

Djupinfiltration av vatten i slutna akviferer där avsikten är att motverka sättningar i de överlagrande lerlagren innebär att tryckförhållandena i dessa senare lager måste påverkas. Detta innebär ett läckage av vatten från akviferen till lerlagren. Teorier för tryckförändringsförloppet vid läckage kan översiktligt beskrivas för akviferer med dels stort läckage, dels litet läckage. För stora läckage har Jacob [9] och senare Hantush [10] behandlat tryckförändringarnas förlopp i akviferen, dels med och dels utan hänsynstagande till magasinförändring i de lågpermeabla lagren. De härvid erhållna uttrycken framgår av följande ekvationer:

1. Utan hänsyn till magasinförändring i de lågpermeabla lagren

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u, \frac{r}{B}) \quad (15)$$

där

$$\frac{r}{B} = r \cdot \sqrt{\frac{k^1}{k \cdot b \cdot b^1}} \quad (16)$$

k^1 = lågpermeabla lagrets vertikala permeabilitet

b^1 = lågpermeabla lagrets mäktighet

2. Med hänsyn till magasinförändring i de lågpermeabla lagren

$$s = \frac{Q}{4\pi T} H(u, \beta) \quad (17)$$

där

$$\beta = \frac{r}{4b} \sqrt{\frac{k^1 \cdot b \cdot S^1}{k \cdot b^1 \cdot S}} \quad (18)$$

S^1 = lågpermeabla lagrets magasinskoefficient

Neuman och Witherspoon [12] har utvecklat teorier gällande vattentrycksförändringar i såväl akviferer som överlagrande lågpermeabla lager i samband med propumpning. Dessa arbeten berör akviferer med såväl stort som litet läckage. I akviferer med litet läckage kommer läckagets inverkan på tryckförändringsförloppet i akviferen att vara så litet att detta endast med stor osäkerhet kan observeras från erhållna sambandskurvor. Läckaget

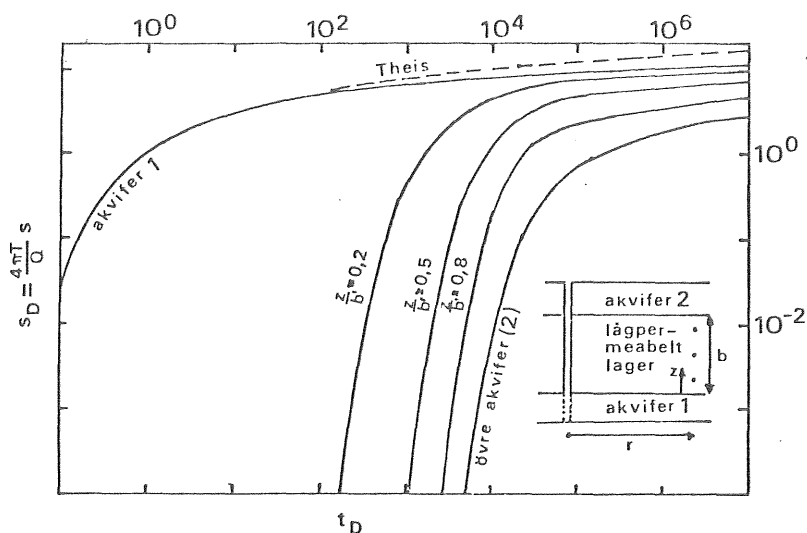


Fig. 5. Vattentrycksförändring i ett två-akvifersystem med givna värden på de geohydrologiska parametrarna (efter Neuman och Witherspoon [12]).
(Change in piezometric head versus dimensionless time in a two aquifer system for given values of the geohydrological parameters (after Neuman and Witherspoon [12]).)

medför dock speciellt i lerlager förhållandevis stora tryckförändringar. I fig. 5 har återgetts tryckförändringsförloppet i såväl akvifer som lågpermeabelt lager under vissa givna värden på ingående geohydrologiska parametrar. Neuman och Witherspoon [11] har i diagram visat förhållandet mellan observerade tryckförändringar i akvifer s och överlagrande lerlager s^1 som funktion av tiden för värden på parametern $\beta < 1$. Med kännedom om de geohydrologiska parametrarna T och S för akviferen samt $\frac{s^1}{s}$ och tid efter infiltrationsstart kan sålunda lerlagrets hydrauliska diffusivitet $\frac{T^1}{S^1}$ beräknas från de av Witherspoon och Neuman [11] i fig. 6 angivna sambandskurvorna. Följande beteckningar och samband utnyttjas härvid

$$t_D = \frac{T \cdot t}{S \cdot r^2} \quad (19)$$

$$t'_D = \frac{T^1 \cdot t}{S^1 \cdot z^2} \quad (20)$$

där z = vertikala avståndet mellan mätpunkt i det lågpermeabla lagret
och akviferens övre begränsning

Analys av tryckförändringarna i både akviferen och de lågpermeabla lagren ger sålunda möjligheter till bestämning av geohydrologiska parametrar även för de lågpermeabla lagren.

Förändring av akviferens geohydrologiska parametrar samt igensättning av infiltrationsbrunnen på grund av det infiltrerade vattnets beskaffenhet

På grund av beskaffenheten hos det infiltrerade vattnet kan förändring av akviferens permeabilitet ske. Genom förekomst av suspenderade partiklar i infiltrationsvattnet erhålles en igensättning som i första hand drabbar förhållandena i och i anslutning till infiltrationsbrunnen. Som en följd av oxidationer, utfällningar eller jonbyten i akviferen orsakade av infiltrationsvattnets beskaffenhet kan förändringar inom akviferen inträffa. Vidare får ej bortses från den inverkan som i infiltrationsvattnet lösta gaser kan ha beträffande akviferens permeabilitet. Infiltrationsvatten med hög halt av monovalenta metalljoner framförallt natrium kan verka upplösande på leraggregat och således medföra en igensättning av infiltrationsbrunnen.

Infiltrationsvattnets inverkan på akviferen dvs igensättning och permeabilitetsförändringar kan sägas utgöra effekter inom längre tidsrymd än de under tidigare rubriker nämnda faktorerna. För att motverka infiltrationsvattnets igensättande effekt måste en djupinfiltrationsanläggning kontinuerligt överses genom att exempelvis infiltrationsbrunnen och den närmast denna belägna delen av akviferen rensas från utfällningar och igensättande partiklar. Kravet på det vatten som utnyttjas för infiltration måste vara stort. Vattnet måste vara fritt från suspenderade partiklar samt ha en låg halt av lösta gaser. Vidare måste vattnets beskaffenhet vara sådan att oxidationer, utfällningar eller jonbyten i

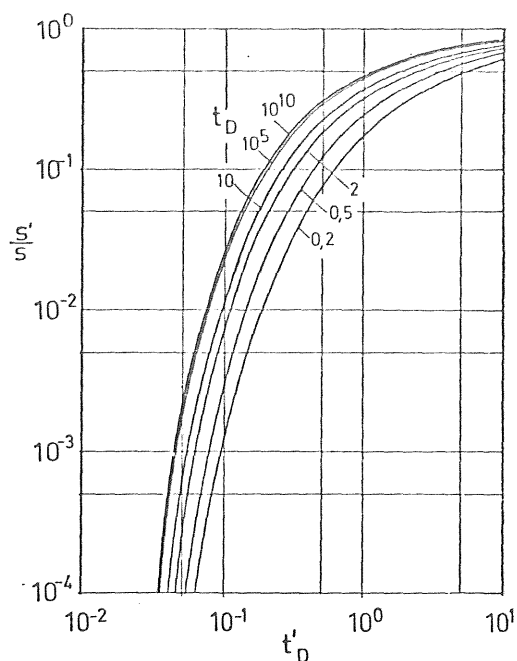


Fig. 6. Sambandet mellan $\frac{s'}{s}$ och t'_D för olika värden på t_D vid ett halv-
oändligt lågpermeabelt lager (efter Neuman och Witherspoon [11]).
($\frac{s'}{s}$ versus t'_D for slightly leaky, semi-infinite caprock according to Neuman
and Witherspoon [11].)

akviferen om möjligt undvikas. Det vatten som till allra största delen uppfyller dessa krav är ett fullgott konsumtionsvatten.

Djupinfiltration i sluten akvifer vid Angered, Göteborg

Geologiska förhållanden

Vid Angered, nordöst om Göteborg, har på grund av ett antal tunnlar i berggrunden grundvattensänkringar i såväl berg som jord observerats. Den geologiska uppbyggnaden inom detta område liksom de inträffade vattentryckssänkningarna har beskrivits av Wedel [8].

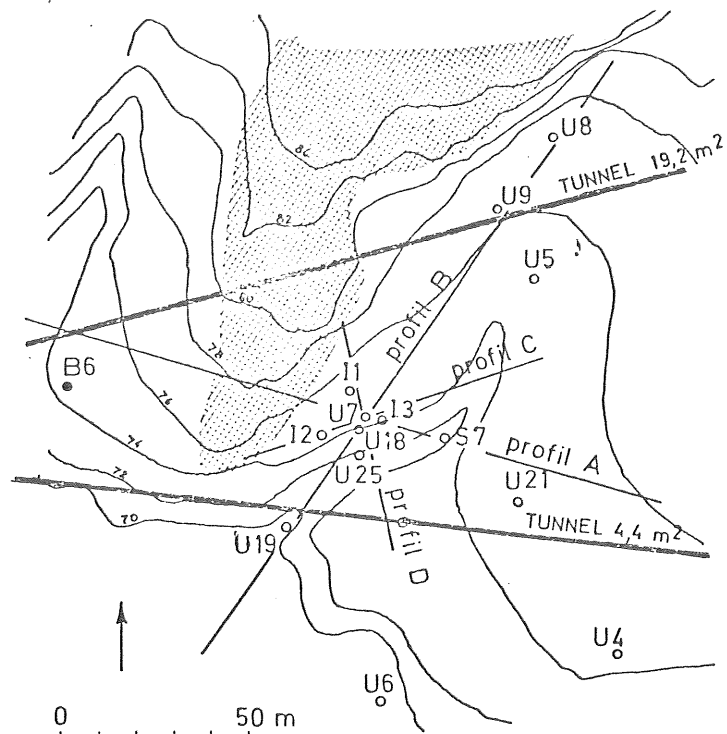


Fig. 7. Topografisk karta över infiltrationsområdet. Rastrerat område betecknar berg i dagen.
(Map of the infiltration area.)

Ett antal försök med djupinfiltration har genomförts inom ett mindre delområde i Angered. Detta infiltrationsområdes topografi samt inom området installerade observationsrör framgår av fig. 7. Geologiskt uppbyggs området av ett i horisontell led begränsat friktionslager med en maximal mäktighet av 2,5 m. Friktionslagret är beläget närmast berggrunden och överlagras av ett 7 - 10 m mäktigt lerlager med inslag av tunna siltsikt. Leran är inom området överkonsoliderad.

Geohydrologiska förhållanden före infiltration

Djupinfiltrationsområdet kan beskrivas som en starkt begränsad sluten akvifer inom vilket grundvattnets tryckyta på grund av avsänkning ställvis är belägen inom akviferen, se fig. 8 och 9. Akviferen kan vidare sägas vara läckande på grund av dels förekommande sprickzon i underlagande berggrund dels överlagrande lågpermeabla lerlager. Områdets grundvattenförhållanden kan, som framgår av fig. 8 och 9, beskrivas som en avsänkings-tratt kring den eller de befintliga läckagepunkter som utgöres av kontakten mellan akviferen och förekommande sprickzon [8]. Hela den begränsade akviferen (ca 7.000 m^2) är påverkad av vattentryckssänkning.

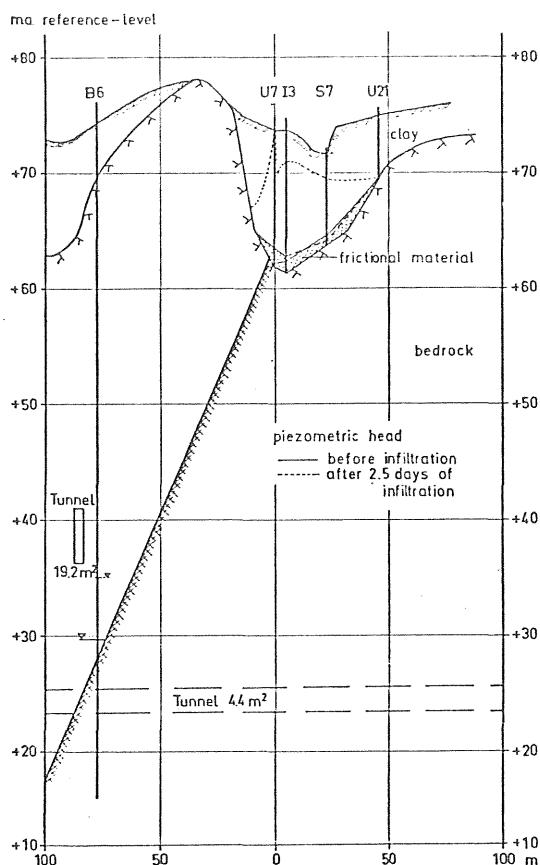


Fig. 8. Profil A över infiltrationsområdet. (Profile A in the infiltration-area.)

Geohydrologiska förhållanden under djupinfiltration

Inom området har 4 st infiltrationsförsök vardera med konstant infiltrationskapacitet genomförts. Vatten infiltrerades i brunn U7, se fig. 7. Före infiltration avluftades vattnet i en ca 1 m^3 stor behållare belägen ca 2 m över markytan. Vattenytan i behållaren hölls hela tiden konstant och vatten fick medelst självtryck passera en ventil där kapaciteten noggrant kunde inställas. Som infiltrationsvatten utnyttjades Göteborgs vattenledningsvatten. Infiltrationsbrunnen utgjordes av 2"-stålrör neddrivet till berg och perforerat längs den nedersta metern. Erhållna vattentrycksförändringar i akviferen är redovisade i fig. 10 och 11 från två av infiltrationsförsöken (II och III). Dessa förändringar är registrerade i 2"-stålrör perforerade längs den nedersta metern. Det erhållna vattentrycket i akviferen före och 2,5 dygn efter infiltrationsstart samt 1 dygn efter stopp av infiltration är redovisade i två sektio-

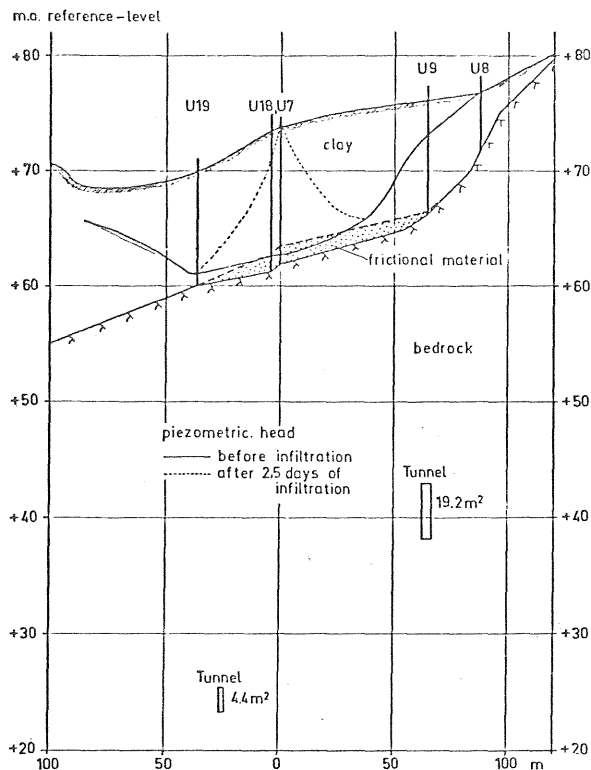


Fig. 9. Profil B över infiltrationsområdet. (Profile B in the infiltration area.)

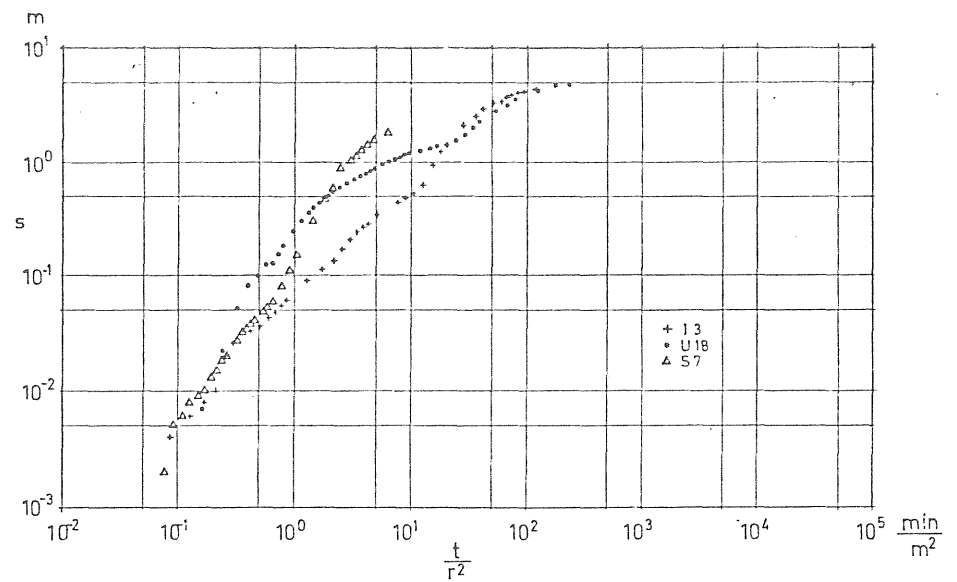


Fig. 10 Vattentrycksförändringen i olika observationsrör under infiltrationsförsök II.
(The change in piezometric head in the aquifer during infiltration test II).

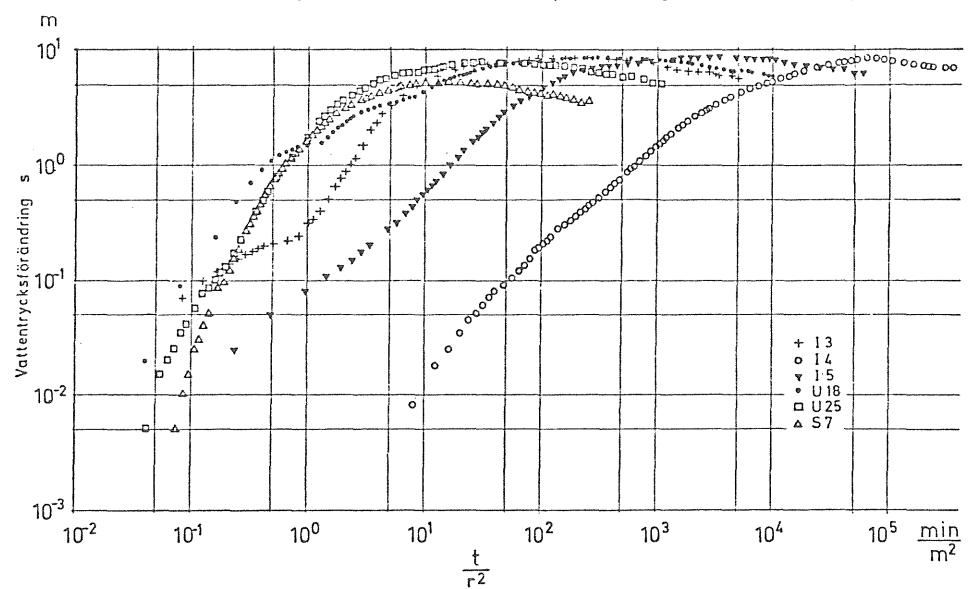


Fig. 11 Vattentrycksförändringen i olika observationsrör under infiltrationsförsök III.
(The change in piezometric head in the aquifer during infiltration test III).

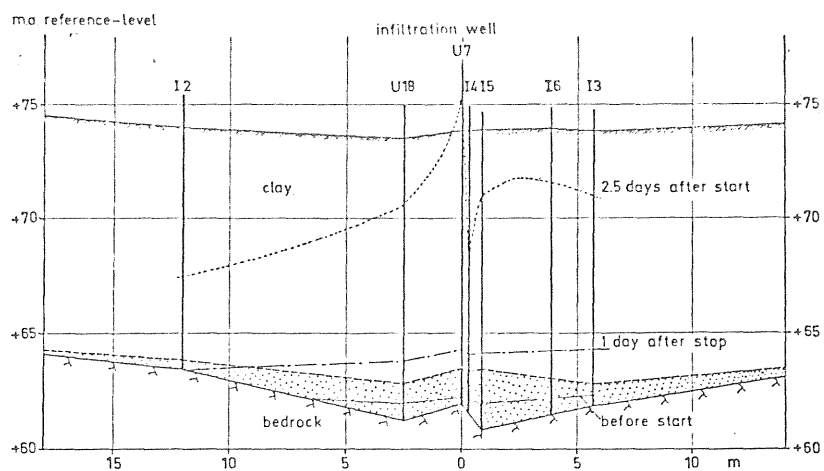


Fig. 12 Profil C över infiltrationsområdet. (Profile C in the infiltration area).

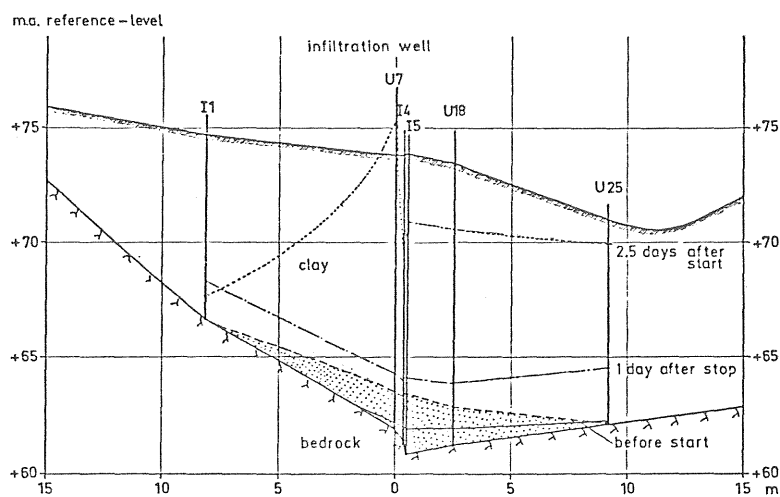


Fig. 13 Profile D över infiltrationsområdet. (Profile D in the infiltration area).

ner över området, fig. 12 och 13. Även i fig. 8 och 9 har vattentrycken efter 2,5 dygns infiltration redovisats. Under infiltration II var kapaciteten 5 l/min och under infiltrationsförsök III var kapaciteten ca 20 l/min under det första dygnet, därefter minskade kapaciteten successivt till ca 8-10 l/min. Denna minskning orsakades i första hand av att ett maximalt vattentryck i infiltrationsbrunnen ej kunde överskridas. Detta maximala tryck, ca 1,5 m över markytan uppnåddes redan efter ca 2 dygns infiltration.

Under infiltrationsförsök III erhöles i stort sett samma tryckförändringsbild i samtliga redovisade observationsrör med undantag av 14 och 15, se fig. 11. Orsaker till denna avvikel-
se under infiltrationens initialskede kan vara flera, dels kan permeabilitetsförhållandena här vara sämre än inom övriga delar av området, dels inverkar vattenmagasinet i observa-
tionsrören (nära avstånd till infiltrationsbrunnen), dels kan rörens perforerade del vara be-
lägen i lerlagren och således ej utvisa vattentrycksförändringen inom akviferen. Mot
detta senare talar de förhållandena att tryckförändringsförloppet efter infiltrationsstopp

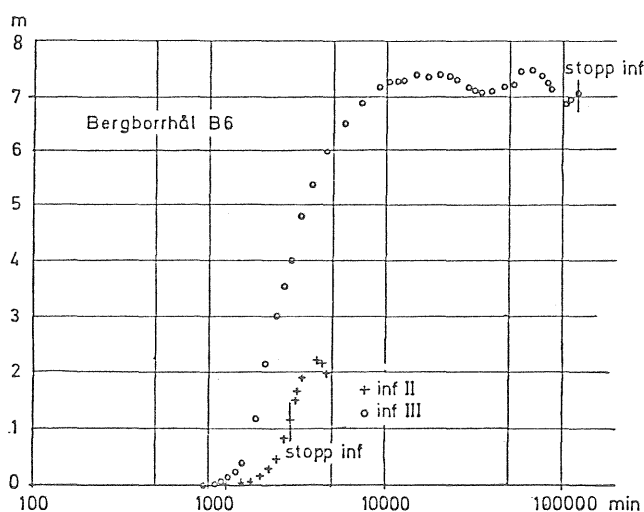


Fig. 14. Vattentrycksförändringen i bergborrhål B6 under infiltrationsförsök II och III.
(The change in piezometric head in the drilled well B6 during infiltration test II and III.)

mycket väl följer förloppet i infiltrationsbrunn U7. En annan möjlig förklaring till registrerad avvikelse kan vara observationsrörens I4 och I5 läge nära den plats där en kommunikation mellan berggrundvattnet och jordgrundvattnet är mest markant, dvs där observerad sprickzon når akviferen. Detta betyder att vatten under infiltrationens initialskede tillförs berggrunden (sprickzon) till en sådan mängd att detta lokalt orsakar en avsänkningsträtt i den större "tryckförhöjningsträtten" inom området. I fig. 8, 12 och 13 har detta förhållande illustrerats. Genom registrering av vattentrycksförhöjningen i bergborrhål B6 beläget ca 80 m från infiltrationsbrunnen torde nämnda läckage kunna verifieras, se fig. 14. Denna tryckförhöjning i berggrunden inträffar förhållandevis lång tid efter infiltrationen startat och, som framgår av infiltrationsförsök II, pågår även efter det att infiltrationen avbrutits.

Under infiltrationsförsök III som pågick under 86 dygn noterades i slutskedet att uppnådda vattentryck i akviferen minskade. Detta torde kunna sättas i samband med en sänkning av infiltrationsvattentrycket i akviferen omedelbart utanför infiltrationsbrunnen, dvs en ökning av infiltrationsbrunnens utströmningsmotstånd. Denna ökning orsakades av igensättning dels av infiltrationsbrunnen, dels av akviferen närmast brunnen. Igensättningen torde vara ett resultat av oxidations- och utfällningsprocesser i och med att det infiltrerade vattnet (Göteborgs vattenledningsvatten) dels var syremättat och dels hade en från det naturligt inom området förekommande grundvattnet avvikande beskaffenhet. I samband med renspolning av infiltrationsbrunnen kunde utfällning av framför allt järn iakttagas i spolvattnet. Ytterligare faktorer som bör beaktas inom det fortsatta arbetet är den effekt som lösta gaser i infiltrationsvattnet kan ha på akviferens geohydrologiska parametrar liksom hur den luft som före infiltration eventuellt förekommer i akviferen påverkar tryckförändringsförloppet.

Analys av akviferens geohydrologiska parametrar och begränsningar pågår under beaktande av den teori som inledningsvis presenterades översiktligt. Högst översiktliga utvärderingar tyder på att tryckförändringarna i den starkt begränsade akviferen påverkas dels av gränseffekterna och dels av ett förhållandevis stort vattenläckage till såväl berggrunden som lerlagren. Mätningar av porttrycksförhållandena inom lerlagren i samband med infiltrationen visar att den undre delen av lerlagren påverkats av infiltrationen genom en vattentrycksökning. Utvärdering av detta material pågår. Översiktligt torde akviferen ha areellt varierande transmissivitet och magasinskoefficient med värden av $10^{-4} - 10^{-5} \text{ m}^2/\text{sek}$ resp $10^{-3} - 10^{-4}$. Storleken av tryckförändringen i akviferen varierar något. I anslutning till infiltrationsbrunnen är tryckförhöjningen 8-9 m, i randområdena mindre. Här inverkar

bergytans topografi och begränsar såväl storleken som areella utbredningen av vattentrycksförhöjningen. Det genom infiltrationen påverkade området har en areell utbredning som i princip överensstämmer med det av vattentrycksänkningen påverkade. På grund av att vatten infiltreras i en starkt begränsad sluten akvifer är registrerat vattentrycksförändringsförlopp mycket snabbt. Således är den med hänsyn till infiltrationskapacitet och tryck maximalt erhållna tryckförhöjningen utbildad redan efter ca 2,5 dygn.

Summary

A brief review is given regarding the theoretical aspects of the change in piezometric head due to infiltration through wells in confined aquifers. Infiltration through wells in a confined aquifer within an area in the Gothenburg region shows very rapid response regarding the piezometric head within the aquifer in the Quaternary deposits. A decreasing head with time during infiltration is supposed to depend on clogging in the infiltration-well.

Tillkännagivande

Detta arbete har utförts inom ramen för BFR:s geohydrologiska forskning. Arbetet har bedrivits inom den geohydrologiska forskningsgruppen vid Chalmers Tekniska Högskola med medel från Statens råd för byggnadsforskning. Projektledare har varit tekn.lic. Axel Björkman vid institutionen för Vattenförsörjnings- och avloppsteknik, Chalmers Tekniska Högskola.

Refererad litteratur

- [1] Theis, C.V. 1935: The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage. - Trans. Am. Geophysical Union, Vol 16 sid 519-524.
- [2] Ferris, J.G., Knowles, D.B., Brown, R.H., Stallman, R.W., 1962: Theory of aquifer tests. - USGS Water-Supply Paper 1536 - E.
- [3] Jacob, C.E. 1940: On the flow of water in an elastic artesian aquifer. - Trans. Am. Geophysical Union, Vol 21, Part II, sid 574-586.

- [4] Stallman, R.W. 1952: Nonequilibrium type curves modified for two-well systems. - USGS Groundwater Note 3.
- [5] Kruseman, G.P., De Ridder, N.A. 1970: Analysis and evaluation of pumping test data. - Reclamation, Bulletin 11. Wageningen.
- [6] Gustafson, G. 1974: A method of calculating the hydraulic properties of esker aquifers. - Nordisk Hydrologisk Konferens, Aalborg, 1974, sid. 525-543.
- [7] Witherspoon, P.A., Javandel, I., Neuman, S.P., Freeze, R.A. 1967: Interpretation of aquifer gas storage conditions from water pumping tests. - American Gas Association, Inc., New York.
- [8] Wedel, P.O. 1975: Exempel på dränering av jordlager på grund av tunnelbyggande. - Nordisk symposium om kvantitativ urban hydrologi, Sarpsborg, 1975.
- [9] Jacob, C.E. 1946: Radial flow in a leaky artesian aquifer. - Trans. Am. Geophysical Union, Vol 27, No. 11, sid 198-208.
- [10] Hantush, M.S. 1960: Modification of the theory of leaky aquifers. - Journal of Geophysical Research, Vol 65 No. 11 sid 3713-3726.
- [11] Neuman, S.P., Witherspoon, P.A. 1972: Field determination of the hydraulic properties of leaky multiple aquifer systems. - Water Resources Research, Vol 8, No 5 sid 1284-1298.
- [12] Neuman, S.P., Witherspoon, P.A. 1969: Theory of flow in a confined two-aquifer system. - Water Resources Research, Vol 5, No 4 sid 830-816.

Te

FÖ

San

I s

sär

till

yto

lös

upp

50

kun

kun

för

gru

änd

av

ran

ling

rels

lera

Inle

Man

med

sätt

lagr

själ

uppk

när

ytan

vattn

net.

med

eller

pump

FÖLJDER AV GRUNDVATTENSÄNKNING INOM LEROMRÅDEN

Sammanfattning

I samband med urbaniseringen av ett jungfruligt område uppkommer ofta en sänkning av den ursprungliga grundvattennivån genom till exempel inläckning till tunnlar i berg eller till följd av minskad infiltration vid hårdgörning av ytor och bortledning av regnvatten i ledningssystem. Inom områden med lösa leravlagringar medför en sänkning av grundvattennivån att sättningar uppkommer, vilka kan ge upphov till bekymmer under lång tid - storleken 50 å 100 år - efter inträffad grundvattensänkning. Som geotekniker vill man kunna förutsäga dessa sättningars tidsförlopp och slutliga storlek. För att kunna göra denna förutsägelse måste man bl. a. ha kännedom om de portrycksförändringar som på lång sikt uppkommer i ett lerlager vid en sänkning av grundvattennivån. I uppsatsen redovisas mätresultat, utvisande portrycksförändringar i lera vid ett antal lokaler där en grundvattensänkning uppkommit av en eller annan orsak. På grundval av mätresultaten och tidigare existerande teorier för sättningsberäkning genomförs en analys av sättningsutvecklingen i ett lerlager vid tre tänkta typfall av grundvattensänkning. En jämförelse görs också mellan beräknade och uppmätta portrycksförändringar i lera vid grundvattensänkning.

Inledning

Man har sedan länge känt till de konsekvenser som grundvattensänkningar kan medföra. Av störst betydelse ur såväl teknisk som ekonomisk synpunkt är de sättningar som inträffar inom områden där jordprofilen utgörs av lösa leravlagringar. I samband med urbaniseringen av ett jungfruligt område skall man självfallet alltid med varje till buds stående medel sträva efter att undvika uppkomsten av en skadlig grundvattensänkning. Myndigheternas ståndpunkt när det gäller frågan om grundvatten och byggande är att ... "grundvattenytan får inte sänkas". Vi vet dock att varje form av bygghet medför att vattnets kretslopp och vattenbalansen påverkas och således även grundvattenet. Allmänt gäller att nederbördsinfiltrationen i marken minskar och därmed också grundvattenbildningen. Grundvattenmagasin kan vidare avtappas eller avsänkas genom bergtunnlar och djupa schakter samt också genom pumpning av grundvatten för konsumtionsändamål.

Mexico City kan inledningsvis tjäna som ett dramatiskt exempel på urbaniseringsprocessens följdverkningar vad gäller uppkomsten av sättningar genom grundvattensänkning. Staden är anlagd inom en sedimentfylld dalgång. Sedimenten utgörs av mäktiga lager av lös lera som underlagras av fast lagrad friktionsjord ur vilken pumpas grundvatten för konsumtionsändmål. Av FIG. 1 framgår befolkningsstillväxten i Mexico City under perioden 1895 - 1960. Som synes har man från och med slutet av 1930-talet haft en nära nog explosionsartad befolkningsökning. I FIG. 2 visas uppmätta sättningsförlopp i olika punkter inom den centrala delen av Mexico City; det bör observeras att den vertikala axeln i sättningsdiagrammet representerar uppmätt sättning i meter. Sättningarna har orsakats genom den till följd av pumpning av grundvatten uppkomna sänkningen av grundvattentrycket i de djupt liggande friktionsjordlagren. Man ser av FIG. 1 och 2 att sättningarnas tidsförlopp mycket väl svarar mot befolkningsutvecklingen eller med andra ord mot de ökade uttagen av grundvatten.

Om en grundvattensänkning av en eller annan anledning har inträffat inom ett sättningsskänsligt område är man såsom geotekniker angelägen om att kunna förutsäga konsekvenserna av denna, dvs. sättningarnas förväntade tidsförlopp och slutliga storlek. För att kunna göra denna förutsägelser måste man känna de randvillkor som styr sättningsutvecklingen. Innan nämna problem närmare studeras skall först göras en kort genomgång av några inom geotekniken grundläggande begrepp.

Totaltryck, portryck och effektivtryck

Spänningstillståndet i en jordprofil karaktäriseras av de tre komponenterna: totaltryck, portryck och effektivtryck. Låt oss studera en idealiserad jordprofil enligt FIG. 3. Jordprofilen sammansätts av ett lerlager som underlagras av ett lager av friktionsjord vilande på berg. Antag att lerans densitet är γ (t/m³). På djupet z (m) under markytan är totaltrycket $\sigma = \gamma \cdot z$ (= totala tyngden per ytenhet av ovanliggande jord inklusive vattnet i jordens porer). Om vattentrycket i jordens porer - portrycket - betecknas u kan effektivtrycket σ' tecknas som:

$$\sigma' = \sigma - u \quad (1)$$

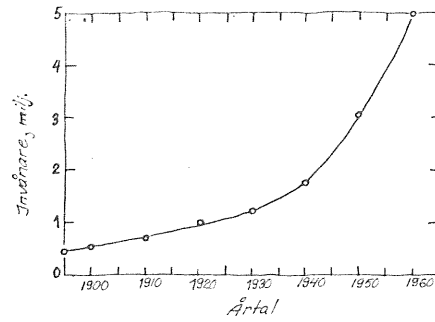


FIG. 1 Befolkningstillväxt i Mexico City.

Increase of the population of Mexico City.

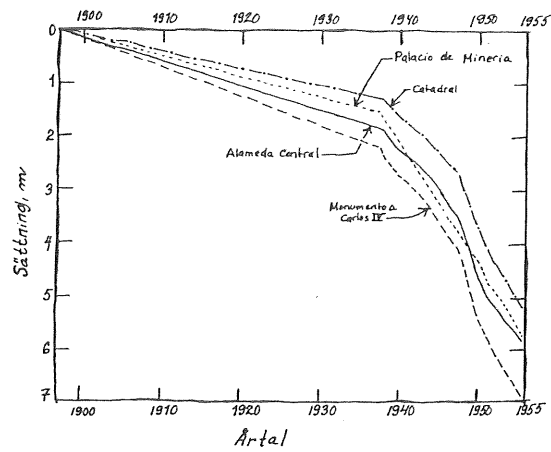


FIG. 2 Sättningsförlopp inom den centrala delen av Mexico City. (After Marsal & Mazari, 1959).

Evolution of subsidence in central parts of Mexico City. The subsidence is caused by a pressure drawdown in deep permeable soils. (Note. The vertical axis gives the settlement in meters).

Effektivtrycket är lika med det tryck som per ytenhet överförs i mineralpartiklarnas kontaktytor.

Under jungfruliga förhållanden råder vanligtvis i porvattnet ett hydrostatiskt trycktillstånd som svarar mot en viss fri grundvattenyta, jfr FIG. 3. Om man exv. såsom visas i FIG. 4 genom dränering via en utsprängd tunnel i berg sänker portrycket med beloppet Δu i gränsytan mellan berg och friktionsjord har man rubbat den ursprungliga rådande hydrostatiska jämvikten i portrycket. Med ledning av ekv. (1) inser vi att en minskning av portrycket u medför en ökning av effektivtrycket, vilket alltid leder till en komprimering av jorden genom utpressning av porvatten. Man säger att jorden konsoliderar. Om jorden utgörs av en finkornig lera pågår konsolideringsprocessen (vattenutpressningen) på grund av hydrodynamisk fördröjning under mycket lång tid.

Sambandet mellan den relativa kompressionen $\mathcal{E}$ och effektivtrycket σ' kan för en normalkonsoliderad ¹⁾ lera representeras av en rät linje i ett halvlogaritmiskt diagram, se FIG. 5a. Det i FIG. 5a visade sambandet innebär att den relativa kompressionen $\Delta \mathcal{E}$ för ett givet spänningstillskott $\Delta \sigma'$ minskar med ökande effektivspänningsnivå, dvs. med ökande djup under markytan.

Konsolideringssättningar

Sättningarnas tidsförlopp i ett lerlager som undergår konsolidering kan beskrivas med den allmänna konsolideringsekvationen för endimensionell porvattenströmning:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_v \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (2)$$

¹⁾ Med normalkonsoliderad lera avses en lera som ej tidigare under sin geologiska historia påverkats av ett högre överlagringstryck än det för stunden rådande.

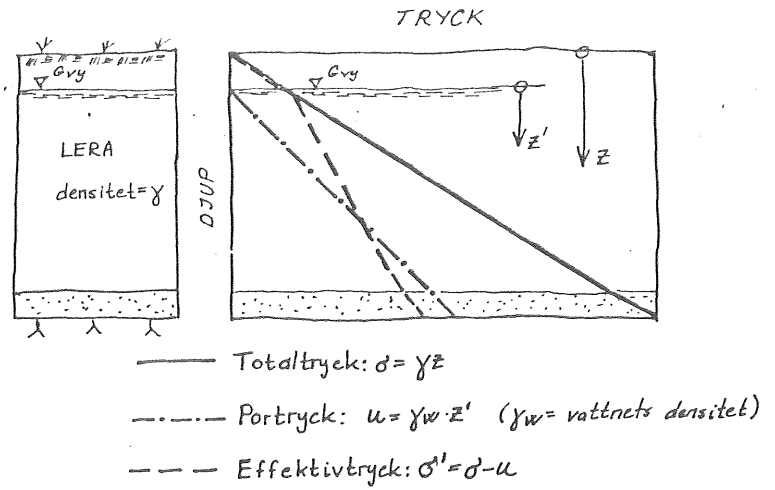
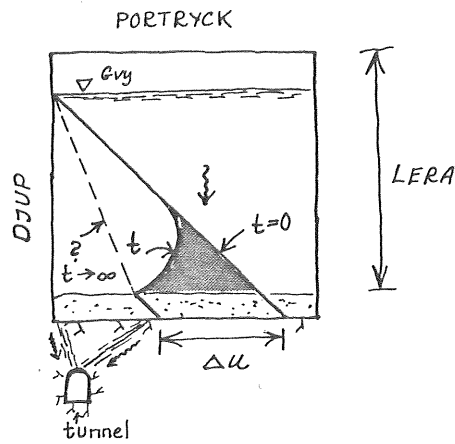


FIG. 3 Totaltryck, pörtryck och effektivtryck i en jordprofil.

Total stress (—); pore pressure (---) and effective stress (-·-·-) acting in a soil profile.
Density of soil = γ .

FIG. 4 Sänkning av grundvattentryck (Δu) genom tunneldrivning i berg. Trycksänkningen ger upphov till ökat effektivtryck i den överlagrande leran.

Pore pressure drawdown (Δu) due to tunneling in rock. The pressure drawdown induces an increased effective stress in the clay, situated above the bottom layer of frictional soil.

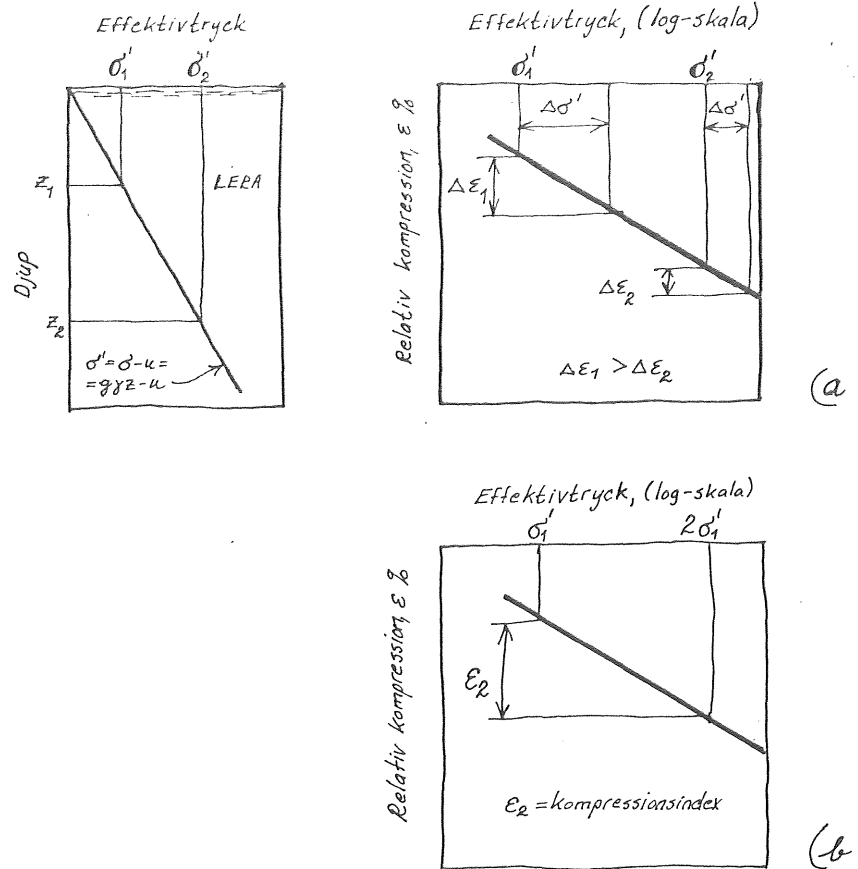


FIG. 5 a) Samband mellan effektivtryck σ'_1 och relativ kompression ϵ hos en normalt konsoliderad lera.

b) Definition av kompressionsindex ϵ_2 .

a) Relationship between effective stress σ'_1 and compression ϵ for a normally consolidated clay.

b) Definition of the compression index ϵ_2 .

där t = tid

u = portrycket vid tiden t

c_v = konsolideringskoefficient $[(\text{längd})^2/\text{tidsenhet}]$

z = djupkoordinat

Konsolideringskoefficienten c_v i ekv. (2) ligger för svenska leror vanligen inom intervallet $0,5 \cdot 10^{-4} - 2 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$.

Om man med ledning av ekv. (2) skall göra en bedömning av inverkan av en konstaterad grundvattensänkning måste man som tidigare nämnts känna de randvillkor som styr konsolideringsprocessen, dvs. man måste känna den portrycksfördelning som vid ett slutligt jämvikttillstånd kommer att råda i jordprofilen.

Portrycksförändringar i lera vid grundvattensänkning

För att utöka den i dag mycket sparsamma informationen om inträffade portrycksförändringar i lera till följd av grundvattensänkning har mätningar genomförts i ett antal relevanta lokaler. Mätningarna har i huvudsak utförts på platser där en grundvattensänkning "nyligen" inträffat till följd av tunneldrivning i berg, men också på platser där lerlager på grund av landhöjningen och dräneringsförhållandena varit utsatta för en grundvattensänkning under mycket lång tid; säg av storleksordningen 1000 år eller mer. En del av resultaten från dessa mätningar kommer att presenteras i den följande framställningen.

Grundvattensänkning genom landhöjningen

En mycket värdefull information om en grundvattensänkningens verkan på lång sikt kan man få genom mätningar i lokaler där till följd av landhöjningen och dräneringsförhållandena ett lerlager varit utsatt för en naturlig grundvattensänkning under en mycket lång tid. Dylika lokaler påträffas bl. a. i Heby i Västmanland och i Granlo, Sundsvall.

Mätningar har gjorts i en lokal där jordprofilen sammansätts av överst ett 2 m mäktigt torvlager som vilar på ett likaså 2 m mäktigt lager av gyttja. Gyttnan underlagras av ett ca 15 m tjockt lerlager, vilande på mäktiga lager av mo och sand. I torvlaget finns en övre grundvattenyta på ett djup av ca 1 m under markytan. Portrycket i mo- och sandlagren under leran motsvarar en grundvattenyta ca 11 m under markytan. I förhållande till den övre grundvattennivån är alltså grundvattentrycket i gränsytan mellan lera och underliggande friktionsjord avsänkt med ca 10 m. På grundval av landhöjningsförloppet kan man förmoda att lerlagret varit dränerat under en tidsrymd av ca 4000 år. Resultatet av portrycksmätningar i den beskrivna jordprofilen visas i FIG. 6.

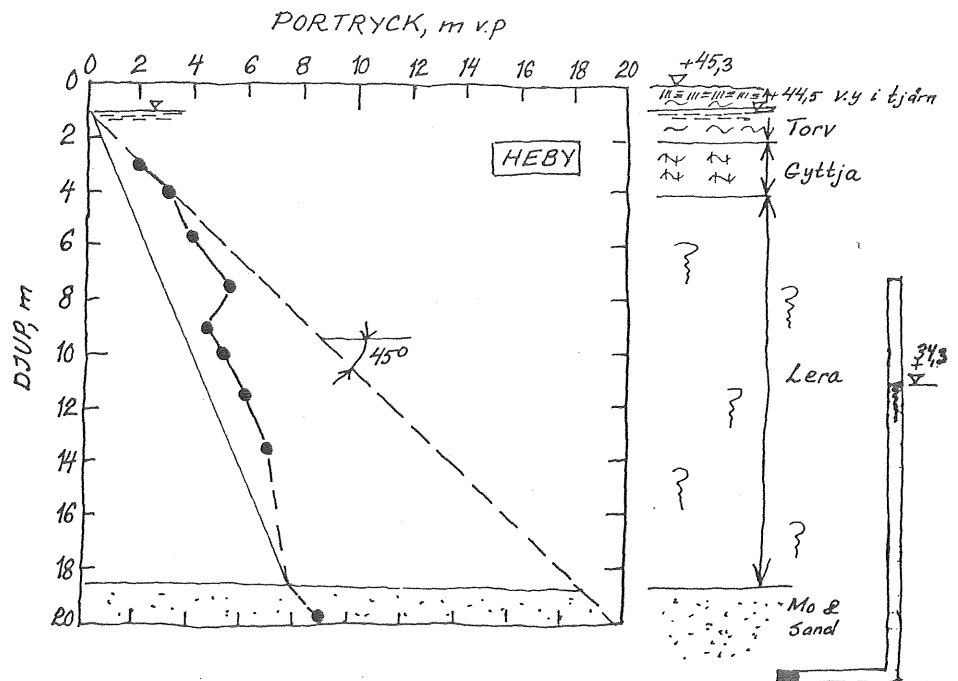


FIG. 6 Resultat av portrycksmätningar i Heby

Results from pore pressure measurements in a clay layer in Heby, Sweden. The clay is underlain by thick deposits of silt and sand.

Man ser att det med utgångspunkt från den fria grundvattenytan i torvlagret råder ett hydrostatiskt trycktillstånd i porvattnet ned till ett djup av 5 å 6 m under markytan, vilket motsvarar ca en tredjedel av tjockleken hos den övre lågpermeabla delen av jordprofilen. Från denna nivå och ned till gränsytan mellan lera och friktionsjord varierar som synes portrycket nära nog rätlinjigt med en gradient av ca 0,35. I detta fall råder alltså ett hydrodynamiskt jämviktstillstånd med nedåtriktad vattenströmning. Vid ett normalt permeabilitetsvärde hos leran innebär den rådande tryckgradienten teoretiskt att vatten strömmar nedåt i jordprofilen med en bruttonhastighet av storleksordningen 1 cm/år eller mindre.

Granlo, Sundsvall

Ytterligare ett exempel på ett lerlager som till följd av landhöjningen varit utsatt för en grundvattensänkning under lång tid utgör Granlo i Sundsvall. I den studerade lokalen utgjordes jordprofilen ursprungligen av överst ett ca 1 m mäktigt torvlagret som underlagras av ett ca 6 m tjockt lerlager, vilande på mäktiga lager av mo och sand. Grundvattenytan i friktionsjorden är belägen ca 2 m under lerlagrets underyta. Om man räknar med en landhöjningshastighet av 0,8 cm/år har lerlagret i detta fall varit dränerat uppskattningsvis ca 1000 år.

Resultatet av portrycksmätningarna i Granlo visas i FIG. 7. Liksom i Heby bestäms portrycket i leran av både en övre och en undre grundvattennivå. I den övre tredjedelen av lerlagret råder ett hydrostatiskt portryck som motsvarar en grundvattenyta i nivå med lerlagrets överyta. I lerlagrets underyta däremot råder ett undertryck av ca 2 m v. p (v. p = vattenpelare) vilket svarar mot avståndet ned till den fria grundvattenytan i mon, som underlagrar leran. Liksom i Heby råder här ett hydrodynamiskt jämviktstillstånd med nedåtriktad porvattenströmning. Tyvärr störs den uppmätta portrycksbilden av att det översta 1 m mäktiga torvlagret i den ursprungliga jordprofilen bortschaktats och ersatts med en ca 2 m mäktig sandfyllning. Sandfyllningen utlades ca 4 år före de aktuella portrycksmätningarna. I FIG. 7 har inlagts en korrigerad, "jungfrulig" portryckskurva som framräknats med hänsyn till kvarstående porövertryck i leran till följd av sandfyllningen.

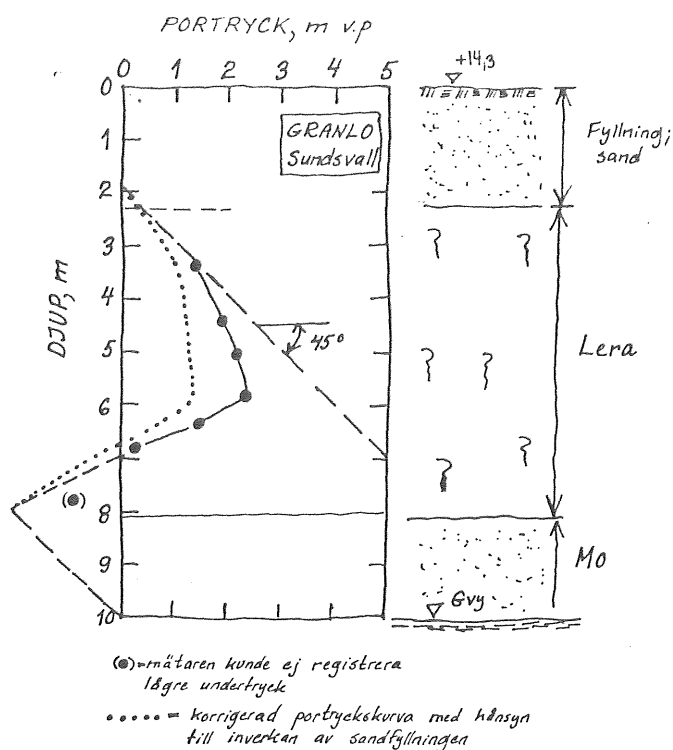


FIG. 7 Resultat av portrycksmätningar i Granlo, Sundsvall.

Results from pore pressure measurements in a clay layer in Sundsvall, Sweden. The clay is underlain by thick deposits of silt and sand.

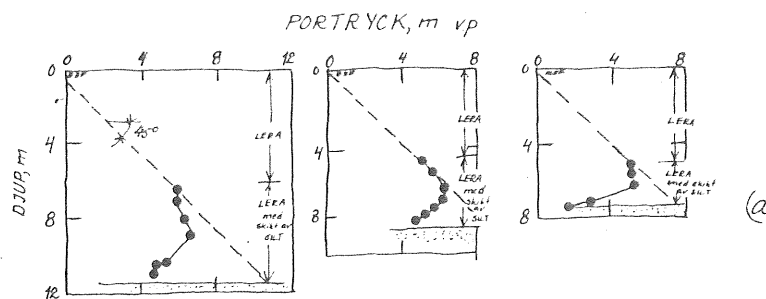
Ingreppsbetingade, "nyligen" inträffade grundvattensänkningar

Som tidigare nämnts har portrycksmätningar i lera gjorts i ett antal lokaler där en sänkning av grundvattentrycket uppkommit genom dränering av bottenlager av friktionsjord via bergtunnlar. I det följande kommer en del av resultaten från tre dylika lokaler att presenteras.

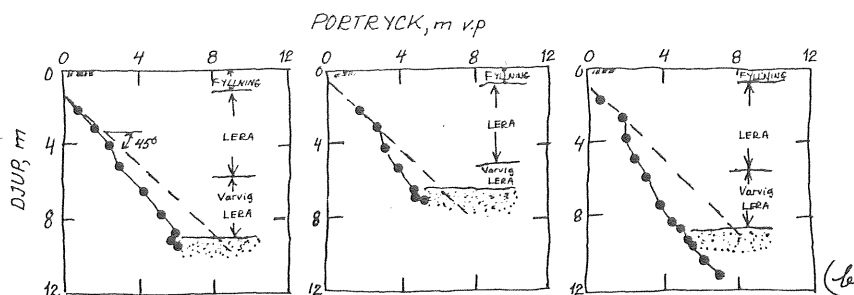
I FIG. 8a visas resultaten från en lokal i Göteborg. Jordprofilen sammansätts av ett 5 å 10 m mäktigt lerlager som underlagras av ett tunt lager av friktionsjord på berg. Den undre delen av lerlagret innehåller tunna skikt av silt. Cirka 10 år före portrycksmätningarna uppkom en sänkning av grundvattentrycket i friktionsjorden genom dränering till en bergtunnel som drogs fram i närheten av mätpunkterna. I de studerade punkterna uppgår avsänkningen till 4 å 7 m v.p. Mätresultaten visar, FIG. 8a, att det ännu 10 år efter inträffad sänkning av grundvattentrycket endast är den undre tredjedelen av lerlagret som erhållit en påtagbar portryckssänkning.

Av FIG. 8b framgår mätresultat från en lokal i Stockholm. Jordprofilen i de studerade punkterna sammansätts av överst en 0,5 - 1,2 m tjock fyllning som underlagras av ett 6 å 8 m mäktigt lerlager, vilande på friktionsjord. Leran är mestadels siltig och sandig och i den undre delen av lerlagret förekommer skikt av sand och silt. I samband med utsprängningen av en bergtunnel, vilket gjordes ca 15 år före de aktuella portrycksmätningarna, uppkom en sänkning av grundvattentrycket i friktionsjorden av storleken 2 å 3 m v.p. Mätresultaten visar, FIG. 8b, att det i den övre tredjedelen av lerlagret råder ett hydrostatiskt portryck räknat med utgångspunkt från lerlagrets överyta. Inom den övriga delen av lerlagret råder en nära nog rätlinjig portrycksfördelning mellan trycket på tredjedelsnivån och trycket i friktionsjorden. Den uppmätta portrycksfördelningen motsvarar sannolikt ett slutligt hydrodynamiskt jämviktstillstånd med nedåtriktad porvattenströmning.

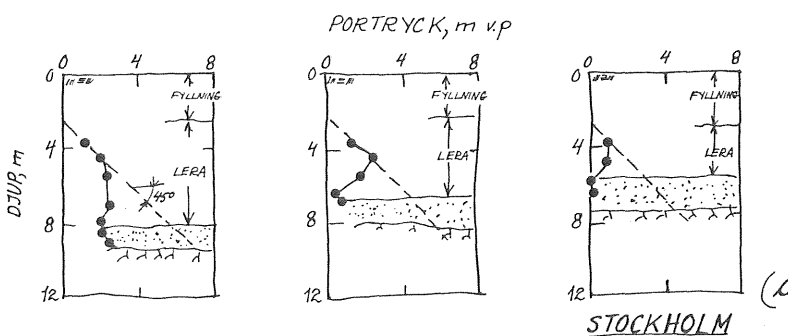
I FIG. 8c visas mätresultaten från ytterligare en lokal i Stockholm. Jordprofilen sammansätts av överst en 2 å 3 m mäktig fyllning som underlagras av ett 3 till 6 m tjockt lerlager, vilande på friktionsjord. Det är sannolikt att den uppmätta trycksänkningen i friktionsjorden av storleken 3 å 4 m v.p. uppkommit i samband med tunnelarbeten ca 20 år före de visade portrycksmätningarna. I likhet med nyssnämnda fall visar mätresultaten i FIG. 8c, att det i den övre tredjedelen av lerlagret råder ett hydrostatiskt portryck räknat med utgångspunkt från lerlagrets överyta. Den nära nog rätlinjiga portrycksfördelningen inom den övriga delen av lerlagret indikerar att det också i detta fall har inträtt ett slutligt hydrodynamiskt jämviktstillstånd.



GÖTEBORG



STOCKHOLM



STOCKHOLM

FIG. 8 Resultat från porttrycksmätningar i lera i Göteborg och Stockholm. Genom tunnelarbeten i berg har i samtliga fall uppkommit en porttryckssänkning i lerlagrets underkant.

Results from pore pressure measurements in clay layers in Göteborg and Stockholm, Sweden. Due to tunneling in rock a drawdown in pore pressure has occurred in the lower part of each of the three different clay layers.

Beräkning av sättningar och portrycksförändringar vid grundvattensänkning

Som tidigare framhållits måste man vid en beräkning av sättningsutvecklingen i ett lerlager vid grundvattensänkning känna de randvillkor som styr konsolideringsförloppet, dvs. man måste känna den slutliga portrycksfördelningen vid jämviktstillstånd. Av de mätresultat som redovisats i FIG. 6, 7 och 8b, c kan man sammanfattningsvis konstatera att vid en sänkning av grundvattentrycket i underkanten av ett lerlager har vid förmodade jämviktstillstånd uppmätts ett hydrostatiskt portryck inom den övre tredjedelen av lerlagret. Detta gäller även i fall med tämligen begränsad eller ingen ytinfiltration - stensatta ytor och källargolv. Under tredjedelsnivån har portrycket i leran i regel varierat rätlinjigt och anslutit till trycket i friktionsjorden, dvs. inom denna del av jordprofilen råder ett hydrodynamiskt tillstånd med ständig nedåtriktad strömning av porvatten. Den per tidsenhet ur lerlagret utströmmande vattenmängden kompenseras av ovanifrån och från sidorna infiltrerat vatten. Som visats så fordras i en ordinär lera en mycket ringa infiltration per tidsenhet för att upprätthålla de i fält uppmätta strömningsgradienterna.

Beräkning av sättningar

I FIG. 9 redovisas resultaten av beräknade sättningsförlopp vid tre tänkta typfall av grundvattensänkning. En analys av portrycksförändringar i lera till följd av grundvattensänkning vid liknande typfall har tidigare gjorts av Hansbo (1973). Den undersökta jordprofilen har antagits bestå av överst ett 1,5 m sandlager som vilar på ett normalkonsoliderat lerlager av tjockleken H_0 , vilken valts till 10 resp. 20 m. Leran underlagras av ett dränerade skikt av friktionsjord. Den normalkonsoliderade leran har antagits ha följande egenskaper:

$$\text{densitet, } \gamma = 1,6 \text{ t/m}^3$$

$$\text{komppressionsindex } \mathcal{E}_2 = 12 \% \quad 1)$$

$$\text{konsolideringskoefficient } c_v = 1,0 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}.$$

1) Komppressionsindex $\mathcal{E}_2$ definieras som den relativa kompressionen vid en fördubbling av effektivtrycket, jfr FIG. 5b.

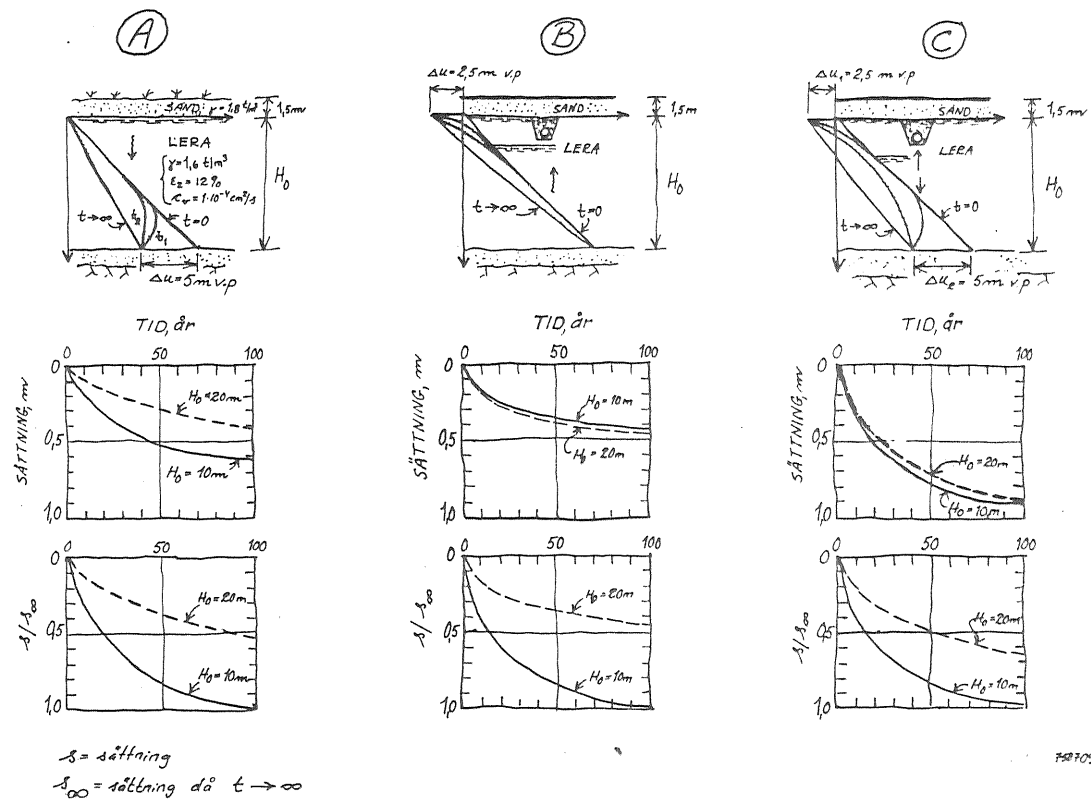


FIG. 9 Beräknade sättningsförlopp vid tre typfall av grundvattensänkning i ett lerlager av tjockleken 10 resp. 20 m.

Calculated time/settlement curves for three cases of pore pressure drawdown in a normally consolidated clay layer with a thickness, H_0 , of 10 and 20 m, respectively.

Den valda storleken på ovanstående parametrar kan sägas motsvara egenskaperna hos en ordinär normalkonsoliderad lera. I jordprofilen har antagits ett ursprungligen hydrostatiskt portryck, motsvarande en grundvattenyta i nivå med lerlagrets överyta.

I fall A, FIG. 9, har antagits en trycksänkning till följd av tunneldrivning i berg av 5 m v. p i underkanten av lerlagret. Den övre grundvattennivån har genom infiltration i ytan antagits vara oförändrad. I fall B har förutsatts en avsänkning av den övre grundvattennivån med 2,5 m v. p medan portrycket i underkanten av lerlagret antagits vara oförändrat. Denna typ av avsänkning kan tänkas uppkomma vid utförandet av dränerande ledningsgravar i kombination med en tät ytbeläggning och bortledning av regnvatten i ledningssystem. Fall C utgör en kombination av fall A och B, dvs. såväl en avsänkning av den övre grundvattennivån med 2,5 m v. p som en trycksänkning i underkanten av lerlagret av 5 m v. p. I samtliga fall har portrycket vid ett slutligt jämviktstillstånd ($t \rightarrow \infty$) antagits variera rätlinjigt mellan trycket i friktionsjorden och den övre grundvattennivån. Den slutliga ökningen i effektivtryck i lerlagret vid de tre studerade fallen representeras, som visas i FIG. 9, av ytorna som begränsas av de slutliga och ursprungliga trycklinjerna. Med utgångspunkt från de i verkligheten uppmätta portrycksförändringarna i lera vid grundvattensänkning som redovisats i FIG. 6 - 8 torde den i FIG. 9A antagna slutliga tryckfördelningen ge beräkningsresultat på säkra sidan, dvs. beräknade sättningar borde överstiga de som kan förväntas i verkligheten. Ytterligare ett förenklat antagande som allmänt gjorts vid sättningsanalysen är att trycksänkningarna förutsatts uppkomma momentant. Antagandet kan väl svara mot förhållandena i ett slutet grundvattenmagasin vid en trycksänkning till följd av dränering till en bergtunnel. En avsänkning av en övre grundvattennivå - portrycksnivå - genom minskad infiltration och genom dränering via rörgravar torde däremot vara en process som pågår under förhållandevis lång tid. Detta betyder att sättningshastigheten i fall B och C i verkligheten borde vara mindre än vad som teoretiskt beräknats.

Av beräkningsresultaten i FIG. 9 framgår för det första att en grundvattensänkning i ett 10 å 20 m mäktigt lerlager ger upphov till sättningar som kommer att skapa bekymmer under mycket lång tid. Efter 50 år har i de studerade fallen utbildats 80 å 85 % av den slutliga sättningen i ett 10 m mäktigt ler-

lager medan motsvarande värde för ett 20 m mäktigt lager uppgår till 40 à 50 %. För det andra är det intressant att notera att i de analyserade fallen ett 10 m mäktigt lerlager under de första 100 åren efter inträffad grundvattensänkning teoretiskt ger upphov till större eller lika stor sättning som ett 20 m mäktigt lager.

Vid beräkningarna i FIG. 9 har förutsatts att leran är homogen. I många fall kan detta antagande vara en grov förenkling av verkligheten. Ofta förekommer tunna skikt av silt eller sand inbäddade i leran. Om dessa skikt är sammanhängande finns förutsättningar för att de kan fungera dränerande. I FIG. 10 åskådliggörs inverkan med avseende på sättningshastigheten av ett dylikt drä-

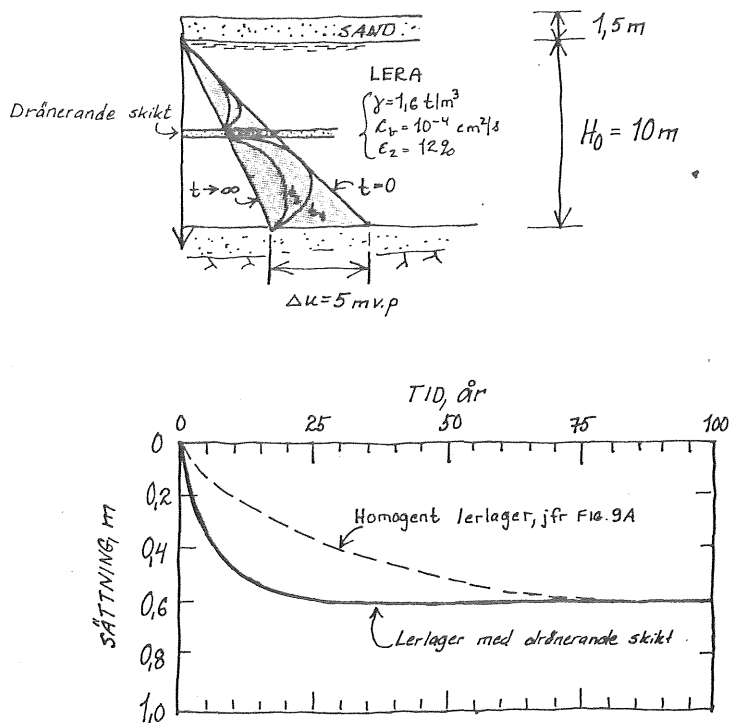


FIG. 10 Inverkan på sättningshastigheten av ett dränerande skikt, inbäddat i ett 10 m mäktigt lerlager.

Influence on the rate of settlement of a thin draining layer, embedded in a 10 m thick clay deposit.

nerande skikt i mitten av ett 10 m mäktigt lerlager. I likhet med fall A i FIG. 9 har i detta fall antagits en trycksänkning av 5 m v. p i underkanten av lerlagret. Vidare har antagits att den slutliga trycksänkningen av 2,5 m v. p i det dränerande skiktet i lerlagrets mitt uppkommer momentant. Som synes, FIG. 10, ger ett fridränerande skikt i lerlagrets mitt upphov till en sättnings-hastighet som är avsevärt högre än den som erhålls i ett homogent lerlager. Den slutliga sättningen har givetvis samma värde oavsett dräneringsförhållan-dena.

Om man i exemplet i FIG. 9A i stället för det antagna hydrodynamiska slut-tillståndet gör det mycket konservativa antagandet att trycksänkningen i ett slutligt jämviktstillstånd är lika stor genom hela lerlagret - dvs. hydrosta-tiskt slutstadium - erhålls för ett 10 m mäktigt lerlager ett beräknat sätt-ningsförlopp som åskådliggörs i FIG. 11. Beräkningen har gjorts under förutsättning av enbart nedåtriktad porvattenströmning. Som jämförelse visas också i FIG. 11 den beräknade sättningsutvecklingen vid ett hydrodyna-miskt slutstillstånd, jfr FIG. 9A. Det är intressant att notera, FIG. 11, att trots de skilda randvillkoren - hydrostatiskt resp. hydrodynamiskt sluttill-stånd - ger analysen identiska sättningsförlopp fram till ca 30 år efter inträffad grundvattensänkning. Den beräknade slutliga sättningen blir dock avsevärt större vid ett antaget hydrostatiskt sluttillstånd än vid ett hyd-rodynamiskt sluttillstånd. De redovisade mätresultaten från inträffade grund-vattensänkningar, FIG. 6 - 8, tyder emellertid på att ett antaget hydrostatiskt slutstadium mestadels borde ge en alltför pessimistisk bild av verkligheten.

Beräkning av portrycksförändringar

Av FIG. 12 framgår beräknade portrycksfördelningar - portrycksisokroner - i ett 15 m mäktigt lerlager vid olika tidpunkter efter inträffad grundvatten-sänkning. Beräkningen avser en lokal på Hisingen i Göteborg. Leran har en konsolideringskoefficient c_v av storleken $1,0 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$. Ursprungligen rådde ett hydrostatiskt portryck, motsvarande en grundvattenyta ca 1 m under

markytan. I samband med tunneldrivning i berg uppkom en trycksänkning av ca 6 m v. p i friktionsjorden under leran. Portrycksisokronerna i FIG. 12 har beräknats med utgångspunkt från ett hydrodynamiskt sluttillstånd såsom framgår av figuren. Cirka 4 år efter den inträffade grundvattensänkningsen gjordes en portrycksmätning i lerprofilen. Som synes av resultaten i FIG. 12 föreligger i detta fall en extremt god överensstämmelse mellan beräknade och uppmätta portrycksförändringar till följd av trycksänkningen i lerlagrets underkant.

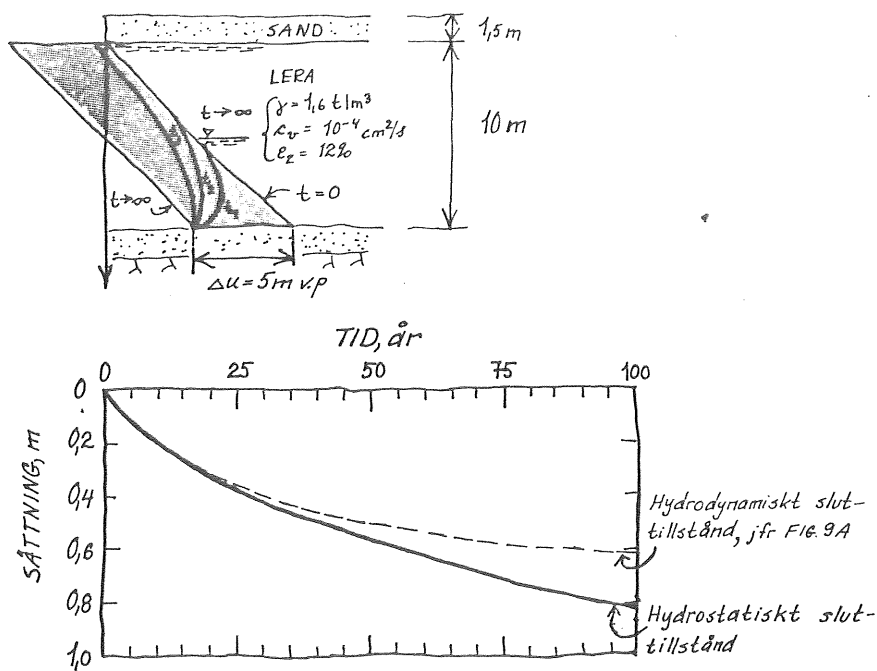


FIG. 11 Jämförelse mellan sättningsförloppen för ett 10 m mäktigt lerlager vid ett antaget hydrostatiskt respektive hydrodynamiskt sluttillstånd.

Settlements produced by a pressure drawdown in the bottom of a 10 m thick clay layer. Comparison between calculated time vs. settlement curves, assuming either a hydrostatic or hydrodynamic final of pore pressure distribution.

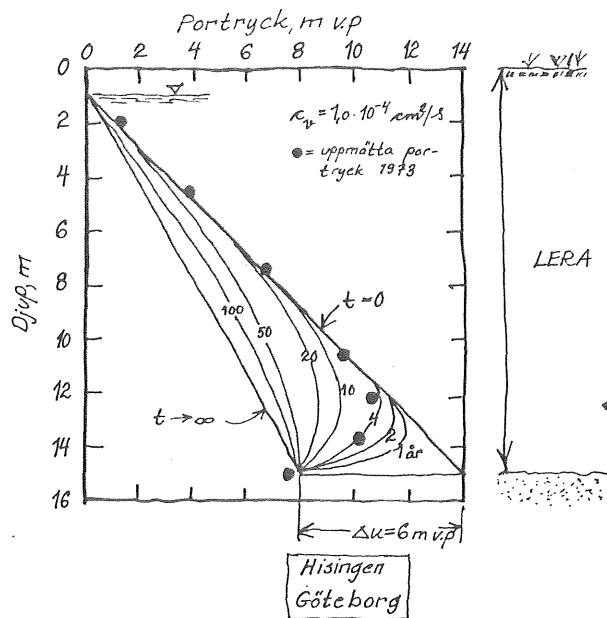


FIG. 12 Beräknade portrycksisokroner vid en trycksänkning av 6 m v.p. i underkanten av ett 15 m mäktigt lerlager. En mätning av portrycksfördelningen har gjorts ca 4 år efter inträffad trycksänkning.

Calculated pore pressure isochrones representing the progress of consolidation caused by a pressure drawdown, amounting to 6 meters of water, in the bottom of a 15 m thick, homogeneous clay layer. - In the figure is also shown the measured pore pressure distribution about four years after that the pressure drawdown occurred.

Summary

The urbanization of virgin areas often results in a drawdown of the ground water pressure, existing in soil and rock. This drawdown may be caused by leakage of groundwater into tunnels in rock and also by a reduction of the infiltration of water into the soil due to both an impervious covering of the soil surface and conduit-systems for storm-water disposal. Further more, the pumping of water for consumption purposes may also result in a pressure drawdown in deep permeable soils. Within areas covered of deposits of compressible clay a drawdown in the ground water pressure results in a subsidence of the soil surface. In a clay layer of a thickness within the range of 10 to 20 meters this subsidence will cause continuous troubles for a long period of time; say of the order of 50 to 100 years or more. This paper analyses the problem of making predictions, based on fundamental soil mechanics principles, of both the rate and the final magnitude of the subsidence due to a drawdown in the ground-water pressure in a clay layer. A study is made of the evolution of subsidence assuming three different boundary conditions regarding the distribution, within the compressible soil layer, of the drawdown in ground water pressure.

Litteratur

- Hansbo, S, 1973, Beräkning av porttrycksminskning till följd av grundvatten-sänkning. Väg- och Vattenbyggaren nr 2, Stockholm.
- Marsal, R, J & Mazari, Y, M, 1959, El subsuelo de la ciudad de Mexico. 1. Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico City.

DISKUSJON

Carlstedt: Av exemplet från Mariatorget i Stockholm framgick att någon uttorkning av leran i övre delen ej förekommer trots att markytorna där är till övervägande del hårdgjorda. Kan detta vara tack vare utläckning av vatten ur befintliga avloppsledningar ?

Torstensson: Man vet att det sker en utläckning från avloppsledningar, men detta är sannolikt ej den enda orsaken till att den övre delen av lerlagret ej uttorkats.

Lars Gottschalk och Janusz Niemczynowicz
(Institutionen för teknisk vattenresurslära LTH/LU)

AVRINNING FRÅN HÄRDGJORDA YTOR - EN MODELLSTUDIE

(Surface Runoff from Impermeable Surfaces - a Model Study)

Sammanfattning

En inledande studie av avrinningen från hårdgjorda ytor har gjorts med hjälp av en fysikalisk avrinningsmodell utrustad med en regnsimulator. Uppsatsen ger en beskrivning av avrinningshydrograferas utseende för olika typer av impermeabla ytbeläggningar. Sambandet mellan magasinering och avrinning diskuteras. För beskrivning av avrinningsförloppet har några enkla matematiska modeller testats.

1. Inledning

För att beskriva avrinning från små rurala avrinningsområden tillämpas i första hand klumpbeskrivning. Den främsta anledningen är härvid den relativa enkelheten i en sådan beskrivning, men också det förhållandet att ett litet ruralt område kan behandlas som en homogen enhet och dess effekt på avrinningen huvudsakligen kan förklaras som magasinering. Detta innebär att man ej beaktar rena translationsfenomen, vilka i och för sig enkelt beskrivs genom t ex ett tid-areadiagram.

Om ett ruralt område som en god approximation kan beskrivas med en magasinsmodell, så är detta inte fallet för ett urbaniserat område. För beskrivningen av detta är det av stor vikt att den rumsliga fördelningen av hårdgjorda ytor ingår. En distribuerad modell är således nödvändig. Bygger vi upp modellen av relativt enkla standardiserade element, som var för sig beskriver en lämplig enhet av avrinningsområdet, erhåller vi en beskrivning som förutom att ta hänsyn till den rumsliga fördelningen också i hög grad blir flexibel och lämplig för numerisk lösning på dator.

Två olika faser i avrinningsprocessen kan urskiljas, en tillrinningsdel och en transportdel. Tillrinningen sker från tak, parkeringsplatser och gator. Dessa eller delar därav utgör därmed lämpliga enheter för tillrinningsdelen. Transporten sker i rännstenar och rörledningar. Magasinering och translation är viktiga faktorer vid båda faserna.

Problemet är att finna lämpliga matematiska modeller för respektive tillrinnings- och transportfas, och att vidare finna samband mellan karakteristika för enheter

Doc. Per Wedel (Geologiska inst. Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg)

EXEMPEL PÅ DRÄNERING AV JORDLAGER P. G. A. TUNNELBYGGANDE

Sammanfattning

Samspelet mellan grundvattenförhållandena i jordlagren och berggrundvattnet är föga känt. Genom utsprängning av tunnlar i berggrunden har i flera fall åstadkommits ogynnsamma sänkningar av grundvattennivån i jordlagren. I denna redogörelse presenteras ett exempel på sådan avsänkning. Området har detaljundersökts med sikte på att utreda hur berggrundens svaghetszoner påverkar grundvattenförhållandena i jordlagren.

INLEDNING

Inom ramen för geohydrologiska forskningsgruppens vid Chalmers Tekniska Högskola verksamhet har ett område vid Gunnareds gård i Angered undersökts. Försöksområdet är beläget i stadsdelens planerade centrum i nordöstra Göteborg. Avsikten är att i detta begränsade område beskriva grundvattnets bildning, strömning samt samspelet i jord och berg med avseende härpå. Projektet har bedrivits tillsammans med såväl projektet "Markvattenmagasinets betydelse för ytavrinning och grundvattenbildning i ett urbant område" som projektet "Metodstudier för att återställa eller bibehålla grundvattenytan".

TOPOGRAFI OCH GEOLOGI

Försöksområdet vid Gunnared utgöres av en lerslätt ungefär 60-70 m över havet, som ansluter till ett antal bergknallar och mindre ryggar.

Berggrunden inom undersökningsområdet uppbygges huvudsakligen av gnejser med varierande sammansättning och utformning. Gångbergarter uppträder i mindre omfattning. Följande bergarter kan urskiljas: basisk-intermediär gnejs, salisk gnejs, ögongnejs, pegmatit och amfibolit.

Berggrunden inom undersökningsområdet har vid flera tillfällen utsatts för tryckpåkänningar orsakade av spänningstillstånd i jordskorpan. Genom dessa tryckpåkänningar har den strukturbild, som berggrunden uppvisar idag, utbildats. Deformationskrafterna har verkat under två principiellt olika betingelser, dels under en första fas då berggrunden reagerat plastiskt, dels under en andra då den varit i stort sett rigid.

Under veckningsrörelserna har förskiffringsplan utbildats där planparallella

glidningar inträffat i bergartsmassan, medan stänglighet anlagts där rotationsrörelser dominerat. Inom undersökningsområdet stryker förskiffringsplanen i ca N 20-40°E och stupar 20-40°W. Stängligheten stryker ca N 15°W och stupar 10-15°N.

Efter veckningarna har berggrunden förkortats ytterligare. Detta har orsakat överskjutningsrörelser, varvid de olika bergartsleden skjutits upp över varandra.

Efter de plastiska veckningarna konsoliderades berggrunden. Vid nya spänningstillstånd i jordskorpan har materialets hållfasthet överskridits, varvid ett mönster av kross- och sprickzoner utbildats. Äldre förskiffrade överskjutningszoner har härvid verkat som svaghetslinjer, längs vilka nya överskjutningar inträffat. Brantstående skjuvzoner uppstod i spetsig vinkel mot deformationsriktningen.

Berggrunden framstår nu som ett system av skollor taktegelformigt täckande varandra. Skollorna är åtskilda av västligt stupande överskjutningszoner med riktningar kring N 10°W och N 20°E och uppdelade i blockenheter genom vertikala skjuvsprickor. Skjuvsprickor och skjuvzoner förekommer i riktningarna N 70°W och N 45°E.

Sprickzoner som utbildats under tryck har i Angeredsområdet visat sig föra svällande lermineral mellan sprickplanen. Detta gäller både överskjutningar och skjuvslag.

Jordarterna i området utgöres främst av lera, som till stor del ansluter direkt till berggrunden. Denna lera underlagras delvis av friktionsjordarter med en mäktighet som kan uppgå till några meter. Leran i området är vanligen överkonsoliderad och mörkt brungrå till grå. Inom hela Angeredsområdet tycks det i leran förekomma talrika moskikt av växlande tjocklek från mindre än en mm till några cm. Invid bergklackarna tycks emellertid stora skillnader föreligga i detta avseende mellan olika delområden. Förklaringen till detta torde vara att sedimentationsmiljön invid bergklackarna varit högst olika. Det bör i detta sammanhang observeras att området är beläget på en nivå relativt nära den högsta nivå till vilken havet har nått och att en del bergklackar i omgivningen nått över denna, vilken har medfört växlingar i sedimentations-

miljön.

Genom de många fördrivningar som utförts har två områden med högpermeabelt friktionsmaterial påvisats. De är båda belägna invid östsidorna av två bergklackar. Fig. 3 och 4.

TUNNLAR

Grundvattnet i området är kraftigt avsänkt genom tre tunnlar. Redogörelsen för dessa är hämtade ur STEGA's rapport till byggforskningen.

"Dagvattentunneln, även kallad Lärjeåntunneln, är dels avsedd för avledning av Lärjeåns högvattenföring, dels för dagvatten från Rannebergen, Angereds centrala delar och södra Gårdsten". Denna tunnel är belägen ungefär vid områdets södra begränsning. "Spillvattentunneln utgör en del av Göteborgsregionens Ryaverksaktiebolags huvudtunnelsystem. Förutom Angered-Bergum avses detta betjäna ytterligare delar av Göteborgsregionen". Denna tunnel går strax söder om försöksområdets centrala del. Gemensamhetstunneln, s k, p g a att flera ledningar förlagts i samma tunnel, går genom försöksområdets norra del.

"Detaljerade geologisk-tektioniska undersökningar har utförts i anslutning till mera definitivt förslag till sträckningar. I samband med de geologiska undersökningarna gjordes seismiska mätningar och jord-bergborrningar. Berg-tunnlarna inom Angered har systematiskt karterats efterhand som utsprängningen avancerat. Karteringarna har utförts med avseende på bergarter, tektonik, förekomst av lermineraliserade sprickor och vattenläckage. Tunnelkarteringarna visar att den framlagda prognosen över bergkvaliteten inom de olika berg-tunnlarna med några undantag överensstämmer med de verkliga förhållandena. Totalt förutsågs att: 7,1 % av den totala sträckningen av gemensamhetstunneln behövdes särskild förstärkning. I verkligheten fick 10,5 % förstärkas. Motsvarande siffor för spillvattentunneln var 5,7 respektive 9,3 %. Dagvattentunnelns läge ändrades i ett sent skede varför någon jämförelse inte kunde göras.



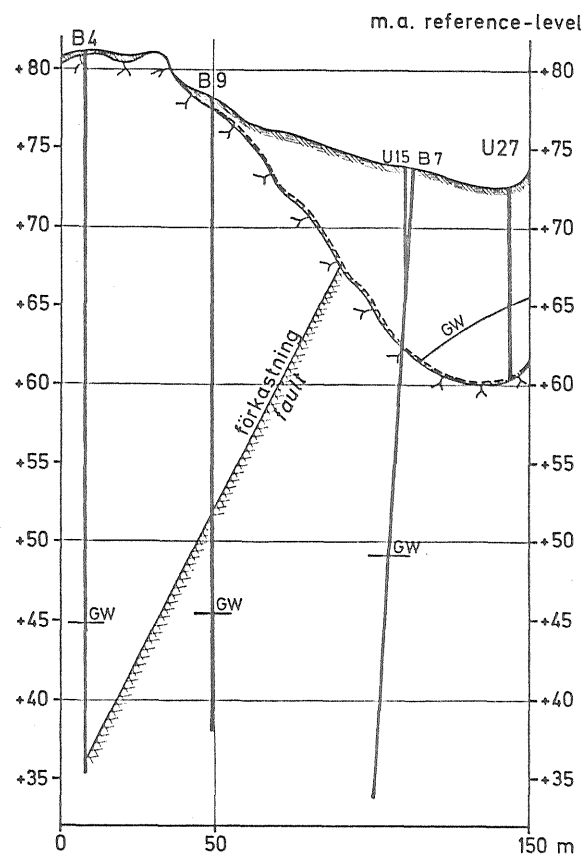


FIG 4 SEKTION, ÖSTRA SÄNKAN
SECTION, EASTERN DEPRESSION

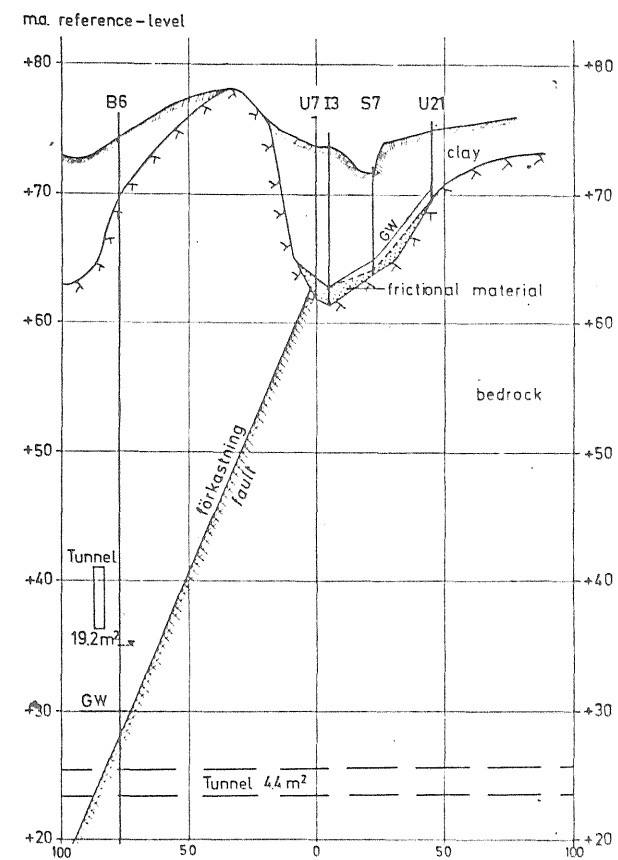


FIG 3 SEKTION, VÄSTRA SÄNKAN
SECTION, WESTERN DEPRESSION

"Läckningen i tunnelsystemet har totalt sett varit liten. Förinjektering har därför inte använts. I samband med tunnarnas utsprängning har dessutom berget driftsförstärkts med betongsprutning inom avsnitt med försämrade sammanhållning. Efterinjektering av tak och väggar samt hela tvärsektionen har utförts efterhand som utsprängningen fortgått. Även efter sprängningarnas slutförande har injektering skett i relativt stor omfattning. De största grundvattenläckagen har förekommit i samband med tektoniska zoner, speciellt inom Angereds centrum och i Rannebergen. I övrigt har läckagen varit av typen vattenförande småsprickor. Vägledande för injekteringens omfattning och tekniska utförande har varit erfarenheter från liknande arbeten i centrala Göteborg (se kap 9). För närvarande (1973) bedöms läckningen vara helt obetydlig."

Av tunnelkarteringen framgår även förekomsten av såväl överskjutningszoner som brantstående skjuvsprickor. Läckagen var dock relativt små. Inläckningen i gemensamhetstunneln har under forskningsprojektet följts upp genom kartering av de avsnitt där grundvatteninläckning kan konstateras. Då uppgiften om inläckning i tunnelsulan saknas är helhetsbilden av inläckningen dock oklar.

UTFÖRDA UNDERSÖKNINGAR

Genom de undersökningar som tidigare gjorts i området dels genom VA-verkets försorg dels genom STEGA's verksamhet var området väl känt vid projektstarten.

Studiet av grundvattnets rörelse mellan jordlagren och berggrunden är föga uppmärksammat och erfarenheter att bygga på saknas i stor utsträckning. I avsikt att utreda grundvattnets strömningar speciellt dräneringen av jordlagren genom berggrundens sprickor har ett observationsnät successivt byggts ut. Detta omfattar såväl bergborrhål som observationsrör i jordlagren.

För att dokumentera områdets uppbyggnad har dessutom inledningsvis två kärnborrhål och ett antal slag- och skruvborrningar i jord utförts. Undersökningarna har kompletterats med geofysiska mätningar främst refraktions-

seismiska. En mycket detaljerad bergnivå karta fig. 2 har på så sätt kunnat framställas.

Allt sedan de första observationsrören drevs i slutet av 1972 har grundvattennivåerna mätts. Härigenom har en god bild av grundvattenfluktuationernas årstidsberoende erhållits. Det har också varit möjligt att studera hur respektive observationsrör påverkas, av nederbördstillfällen, vilket måste vara väl belagt för att utvärderingen av de senare försöken skall kunna genomföras.

Det inledande undersökningsprogrammet omfattade således dokumentation av de naturligt förorsakade variationerna under de förhållanden som utvecklats med anledning av tunnarnas dränerande effekt. Nästa fas i undersökningsprogrammet omfattar påverkan under kontrollerade förhållanden främst slugtest och infiltrationsförsök. Dessa undersökningar har ännu ej slutförts. Resultat av de infiltrationsförsök som genomförts i området med anledning av det samverkande projektet "metodstudier för att återställa eller bibehålla grundvattenytan" redovisas av Carlsson och Kozerski.(1)

GRUNDVATTEN

De intensifierade mätningar av grundvattenförhållandena som genomförts i försöksområdet vid Gunnared sedan slutet av 1972 i jord och sedan sommaren 1973 i berg visar att grundvattennivån i detta delområde fortfarande är kraftigt avsakat. Ehuru en viss återhämtning har ägt rum sedan tunneln sprängdes ut.

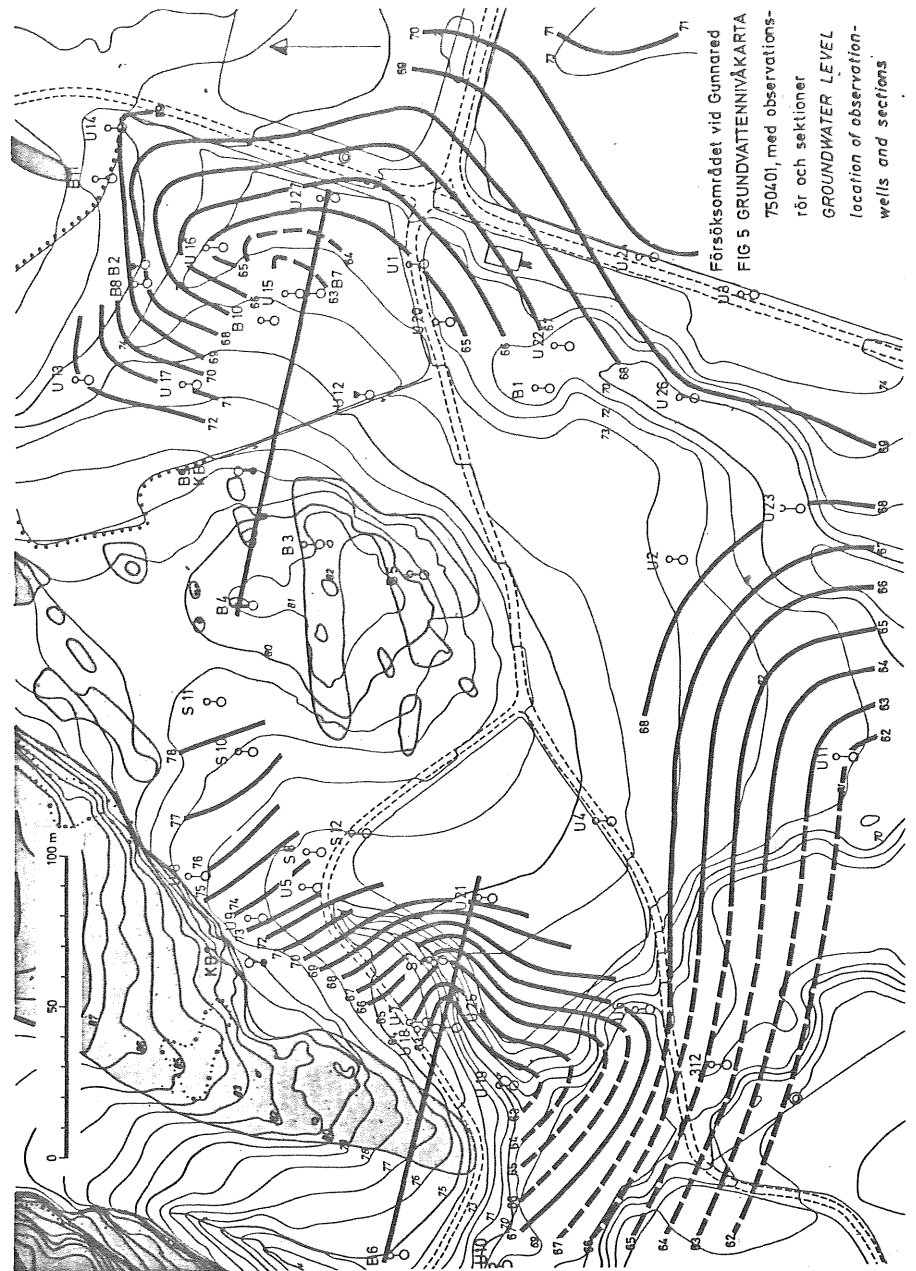
De grundvattennivåer som uppmätts i de olika bergbrunnarna visar att grundvattenytorna i östra delen av försöksområdet ligger högre än tunneltaket. Trycknivån för berggrundvattnet ligger i den östligaste delen strax under trycknivån för grundvattnet i jordlagren. I områdets västra del däremot ligger grundvattenytan uppmätt i bergborrhål, under sulan i den närmaste delen

av gemensamhetstunneln. Anledningen till detta är att berggrunden här även dräneras av spillvattentunneln som i detta avsnitt går 12,3 m djupare än gemensamhetstunneln. Fig. 4. Detta är också förklaringen till varför det ej varit möjligt att upprätta en mätpunkt för att kontrollera hur mycket vatten som rinner fram i sulan på gemensamhetstunneln.

Grundvattenförhållanden i jordlagren har belagts med ett stort antal observationsrör. Mätningarna i dessa finns lagrade på kasettband och grundvattennivåerna för varje mättillfälle (en eller två veckors intervall) kan snabbt plottas. Det framgår härav, att rören i flera fall visar en likformig förändring genom året. Eftersläpning i förhållande till nederbörden är inte densamma för alla rör, men det har varit möjligt att upprita grundvattenbilder för ett högsta vattenstånd och ett minimivattenstånd för resp. vinter högvattenstånd och sensommar lågvattenstånd sedan vintern 1973.

Grundvattenbilden för jordlagren (se karta nr 5) visar tydligt två från varandra skilda avsänkingsområden, det ena i väster över gemensamhetstunneln, det andra i öster men ej över tunneln utan ett stycke söder därom. Avsänkningen i området är alltså ej symmetriskt utbredd från tunnlarna. Ej heller har det visats att avsänkningen följer hela överskjutningszonens utgående vid bergytan. Grundvattennivåbilden visar i stället två begränsade delområden mot vilka grundvattengradienterna i jordlagren är riktade. Detta är så mycket mer anmärkningsvärt som grundvattenytans lutning söder om avsänkningstrattens centrum kommer att luta i motsatt riktning mot markytans lutning trots att det västra området är en ravin med stor lutning ut mot sydsydväst.

Bergytan lutar brantare på den västra sidan av sänkorna än på den östra, se fig. 2. 4. Samstämmiga uppgifter från borrhningar, seismiska och geologisk-tektoniska undersökningar visar att utgåendet av den ena överskjutningszonen återfinns en bit upp på den östra sidan och ej koncentrerats till de djupaste partierna. Utgående i det östra avsänkingsområdet synes i varje fall ej sammanfalla med de djupare partierna. Grundvattenavsänkningen är också störst vid dalgångens västra sida. Gradienten är därför riktad mot denna och det står inget vatten på berget. I de djupaste delarna av sänkan har grundvatten



ytan aldrig under mätperioden avsänkts mer än ungefär till 64 m nivån d v s till ungefär 6 m över bergytan. Påfyllningen av denna del av akvifären uppgår ej till mer än knappt två meter d v s under 66 m nivån. Vid västra bergsidan når grundvattnet å andra sidan ej ens under högvattenståndperioden nivån 62 m.

För att utröna betydelsen av tektoniskt betingade svaghetszoner i berggrunden med avseende på dräneringen av jordlagren har infiltrationsförsök genomförts rakt över utgåendet av de två överskjutningszonerna i anslutning till ovannämnda avsänkingsområden. Infiltrationsförsöken redovisas av Carlsson och Kozerski (2) med avseende på geohydrologiska parametrar och förfarande vid infiltration. I detta sammanhang skall endast nämnas att dessa infiltrationsförsök i hög grad stöder uppfattningen att det är överskjutningszonerna som är av störst och kanske avgörande betydelse för dräneringen. Anledningen till att avsänkningen inte är lika påtaglig längs hela överskjutningszonen kan sökas dels i olikheter längs densamma, dels i olikheter beträffande sammansättningen av jordarterna som ligger an mot berget. Ovannämnda infiltrationsförsök antyder emellertid att friktionslagren här ej har någon utsträckning längs överskjutningszonerna.

För närvarande undersöks vilken betydelse de brantstående skjuvsprickorna har för dräneringen av jordarterna. Det verkar emellertid att döma av hittills gjorda erfarenheter som förutsättningen för en kraftig avsänkning, vilken består efter tunneldrivningsskedet, är förekomsten av såväl en överskjutningszon som friktionslager med relativt hög permeabilitet i anslutning till densamma. I övriga fall verkar det som om grundvattennivån skulle kunna återhämta sig i jordlagren till nära de ursprungliga förhållandena inom området.

I avsikt att söka kvantitativt bestämma grundvattnets strömningsväg har slug test (2) genomförts i de observationsrör där det varit praktiskt möjligt. De teoretiska förutsättningarna som krävs föreligger visserligen ej helt men försöket har ändå givit visst resultat. I det västra avsänkingsområdet visade sålunda dessa kvantitativa beräkningar att vår första grundvattenbild baserad på ett mindre antal observationsrör var felaktig. Den grundvattenbild som konstaterats förutsatte att avsänkningen var riktad i ravinens lutningsriktning ut mot sydsydväst. Efter komplettering av observations punkterna kunde det även i detta område visas att avsänkningen var riktad in i mot ett begränsat område vid bergsidan.

En rad försök i området återstår att genomföra och utvärdera innan en konklusion kan göras men det har visat sig angeläget att kommunicera med andra forskare beträffande dessa frågeställningar och därför har vi tagit tillfället att på detta sätt presentera var vi står redan innan materialet är genomarbetat.

Summary

The interaction between the ground-water level in a confined aquifer and the ground water in the bedrock is little known. Unfavourable lowering of the ground-water level has in many cases been the result of tunnel excavation. In this paper an example of such effects is presented. The area under investigation has been examined very carefully in order to determine the interaction of the principal geological elements of major importance for the lowering of the ground-water level.

Litteratur

1. Carlsson, L. : Djupinfiltration i slutna akviferer (detta symposium, s. 193).
2. Ferris J G, Knowles D B, 1963. The slug-injection test for estimating the coefficient of transmissibility of an aquifer. Geological Survey Water Supply Paper 1536 - I. Washington 1963.
3. Lindskoug N E och Nilsson L Y, Grundvatten och byggande BFR Rapport R 20: 1974.

GEOHYDROLOGISKA FORSKNINGSGRUPPEN

Institutionerna för
Geologi
Geoteknik med grundläggning
Vattenbyggnad
Vattenförsörjnings- och avloppsteknik

Meddelande:

- nr 1 Urbaniseringsprocessens inverkan på ytvattenavrinning och grundvattenbildning.
Lägesrapporter (1972-07-01 - 1973-03-01).
1973.
- nr 2 Leif Carlsson: Grundvattenavsänkning Del 1. Evaluering av akvifärers geohydrologiska data med hjälp av provpumpningsdata.
1973.
- nr 3 Leif Carlsson: Grundvattenavsänkning Del 2. Evaluering av lågpermeabla lagers hydrauliska diffusivitet med hjälp av provpumpningsdata.
1973.
- nr 4 Viktor Arnell: Nederbördsrätmätare. En sammanställning av några olika mätartyper.
1973.
- nr 5 Viktor Arnell: Intensitets-varaktighetskurvor för häftiga regn i Göteborg under 45-årsperioden 1926 - 1971.
1973.
- nr 6 Urbaniseringsprocessens inverkan på ytvattenavrinning och grundvattenbildning.
Lägesrapporter (1973-03-01 - 1974-02-01).
Göteborg 1974.

- nr 7 Olov Holmstrand, Per O Wedel: Ingenjörsgelogiska kartor - litteraturstudier. 1974.
- nr 8 Anders Sjöberg: Interim Report. Models for Gradually Varied Unsteady Free Surface Flow. Development and Discussion of Basic Equations. Preliminary Studies of Methods for Flood Routing in Storm Drains. 1974.
- nr 9 Olov Holmstrand (red.): Seminarium om ingenjörsgelogiska kartor. 1974.
- nr 10 Viktor Arnell, Börje Sjölander: Mätning av nederbördsintensiteter i Göteborgsregionen. Stationsbeskrivning. 1974.
- nr 11 Per-Arne Malmquist, Gilbert Svensson: Rapport från arbetsgruppen "Dagvattnets beskaffenhet och egenskaper". Sammanställning av utförda dagvattenundersökningar i Stockholm och Göteborg 1969 - 1972. The character and properties of urban storm water results from investigations in Stockholm and Gothenburg 1969-1972. English summary. 1974.
- nr 12 Viktor Arnell och Sven Lyngfelt: Interimrapport, Beräkningsmodell för simulering av dagvattenflöde inom bebyggda områden. Geohydrologiska forskningsgruppen i samarbete med Göteborgs va-verk. 1975.
- nr 13 Viktor Arnell och Sven Lyngfelt: Nederbörds-avrinningsmätningar i Bergsjön, Göteborg 1973-1974. 1975.
- nr 14 Per-Arne Malmquist och Gilbert Svensson: Delrapport Dagvattnets sammansättning i Göteborg. Urban storm water quality. Interim report from a study in Gothenburg English summary. 1975.

- nr 15 Viktor Arnell, Sven Lyngfelt, Anders Sjöberg och
Gilbert Svensson: Dagvatten, Uppsatser presenterade
vid konferens om urban hydrologi i Sarpsborg, Norge
1975. 1976.
- nr 16 Leif Andréasson, Leif Carlsson, Klas Cederwall,
Bengt-Arne Torstensson och Per Wedel: Grundvatten
Uppsatser presenterade vid konferens om urban
hydrologi i Sarpsborg, Norge 1975. 1976.
- nr 17 Olov Holmstrand: Markvattenmagasinets betydelse för
ytavrinning och grundvattenbildning inom ett urbant
område. 1976.