



Det här verket har digitaliserats vid Göteborgs universitetsbibliotek och är fritt att använda. Alla tryckta texter är OCR-tolkade till maskinläsbar text. Det betyder att du kan söka och kopiera texten från dokumentet. Vissa äldre dokument med dåligt tryck kan vara svåra att OCR-tolka korrekt vilket medför att den OCR-tolkade texten kan innehålla fel och därför bör man visuellt jämföra med verkets bilder för att avgöra vad som är riktigt.

This work has been digitized at Gothenburg University Library and is free to use. All printed texts have been OCR-processed and converted to machine readable text. This means that you can search and copy text from the document. Some early printed books are hard to OCR-process correctly and the text may contain errors, so one should always visually compare it with the images to determine what is correct.



Djupinfiltration

En metod att upprätthålla
grundvattentrycket i slutna akviferer.

Utförande, drift och kontroll

Ann-Carin Andersson
Leif Carlsson mfl

INSTITUTET FÖR BYGGDOKUMENTATION	
Accnr	80-2559
Plac	See.

V
AM

BYGGDOK

Sankt Eriksgatan 46
112 34 Stockholm
tel: 08-617 74 50
fax: 08-617 74 60

Byggeforskningsrådet

See

R166:1980

DJUPINFILTRATION

En metod att upprätthålla grundvatten-
trycket i slutna akviferer.

Utförande, drift och kontroll.

Ann-Carin Andersson
Leif Carlsson m fl

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 750945-4
från Statens råd för byggnadsforskning till Inst. för
VA-teknik, CTH, Göteborg.

I Byggforskningsrådets rapportserie redovisar forskaren sitt anslagsprojekt. Publiceringen innebär inte att rådet tagit ställning till åsikter, slutsatser och resultat.

R166:1980

ISBN 91-540-3406-X

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

LiberTryck Stockholm 1980 058776

INNEHÅLL

FÖRORD		5
SAMMANFATTNING		7
1	VARFÖR DJUPINFILTRATION	13
1.1	Vad är djupinfiltration?	13
1.2	När används djupinfiltration?	13
1.3	Bakgrund till rapporten	14
2	HUR ÄR FÖRUTSÄTTNINGARNA FÖR DJUPINFILTRATION	15
2.1	Naturliga geohydrologiska förhållanden	15
2.2	Störningar av grundvattenförhållandena	17
2.3	Hur fungerar djupinfiltration teoretiskt?	19
2.4	Hur förändras portrycket vid djupinfiltration?	20
3	VILKA ÄR DE TEKNISKA PROBLEMEN I SAMBAND MED DJUPINFILTRATION	23
4	HUR VÄLJS INFILTRATIONSPLATS	25
4.1	Kriterier på infiltrationsplats	25
4.2	Undersökningsmetoder	30
4.2.1	Vad skall undersökas?	30
4.2.2	Översiktliga undersökningsmetoder	30
4.2.3	Bergdjupsbestämning	30
4.2.4	Provtagning	31
4.2.5	Grundvatten- och portryckmätning	32
4.2.6	Provinfiltration	32
5	HUR UTFÖRS DJUPINFILTRATIONSANLÄGGNINGEN	35
5.1	Vad består en djupinfiltrationsanläggning av?	35
5.2	Hur dimensioneras en djupinfiltrationsbrunn?	35
5.2.1	Teoretisk bakgrund	35
5.2.2	Dimensionering av brunnar i jord	40
5.2.3	Dimensionering av brunnar i berg	44
5.3	Rensningsmetoder	46
5.3.1	Varför måste en infiltrationsbrunn rensumpas?	46
5.3.2	Vilka rensningsmetoder finns?	46
5.4	Praktiska synpunkter	52
5.5	Exempel på djupinfiltrationsanläggningar	53

6	IGENSÄTTNING AV INFILTRATIONSBRUNNAR	55
6.1	Vad menas med igensättning?	55
6.2	Vad beror igensättning på och hur förutsägs och undviks den?	55
6.2.1	Vilka är de igensättande faktorerna?	55
6.2.2	Suspenderat material	56
6.2.3	Luft och andra gaser	57
6.2.4	Kemiska reaktioner	58
6.2.5	Dispergering av lera	63
6.2.6	Mikrobiell aktivitet	65
6.3	Sammanfattning	67
7	DRIFT OCH KONTROLL AV DJUPINFILTRATIONSANLÄGGNING	69
7.1	Vad måste kontrolleras?	69
7.2	Olika kontrollmätningar	69
7.3	Kapacitetstest	71
7.4	Tillsyn och skötsel	76
8	EKONOMISKA ASPEKTER PÅ DJUPINFILTRATION	77
9	BILAGOR	83
9.1	Nomenklatur (Bilaga 1)	83
9.2	Kennkornlinjen (Bilaga 2)	85
9.3	Analys av suspenderat material (Bilaga 3)	86
9.4	Löslighet av luft i vatten (Bilaga 4)	89
10	REFERENSER	91

FÖRORD

Den kraftiga samhällsutbyggnaden under de senaste decennierna har på många håll inneburit att mark med dåliga grundförhållanden tagits i anspråk. Den förändrade markanvändningen med en ökad hårdgöring av markytan vanligen i kombination med ett större och omfattande byggande under mark har medfört rubbningar av den naturliga vattenbalansen. Grundvattenförhållanden har förändrats genom minskad grundvattenbildning samtidigt med ökad dränering vilket resulterat i sjunkande grundvattennivåer och i samband härmed också marksättningar inom områden med lösa leror.

För att motverka skador till följd av marksättningar orsakade av grundvattensänkningar har på flera håll vatten infiltrerats genom brunnar i jord eller berg. Denna metodik som fått namnet djupinfiltration har visat sig kunna uppfylla sitt syfte i många fall men vissa problem har uppkommit avseende dess tillämpning framför allt under längre tid. Statens råd för byggnadsforskning har sedan länge stött forskning och utveckling av metodiken kring djupinfiltration. Under år 1977 tillsattes av BFR en grupp bestående av konsulter och forskare för att i en rapport sammanfatta kunskaperna om djupinfiltrationsmetodiken, hur den verkar, vilka problem som kan uppstå, hur dessa övervinns samt ge råd för utförande, drift och kontroll av djupinfiltration.

Gruppen har haft följande sammansättning

Ann-Carin Andersson	Chalmers tekniska högskola
Göran Bergman	Tyréns
Thorsten Blomquist	VIAK AB
Leif Carlsson, ordförande	Sveriges geologiska undersökning, SGU
Gunnar Gustafson	VIAK AB
Rudolf Martinell	Vyrmetoder AB
Åke Möller	AB Vattenbyggnadsbyrån
Per Riise	Kjessler & Mannerstråle AB

BFR har beviljat anslag för rapportens utarbetande. Ordföranden i gruppen har deltagit på bekostnad av Sveriges geologiska undersökning. Gruppens enda heltidsanställda medlem, Ann-Carin Andersson har utfört sammanställnings- och redigeringsarbetena.



SAMMANFATTNING

KAP 1.

Med djupinfiltration menas vattentillförsel till berg eller jordlager genom borrhål eller brunnar. I Sverige utnyttjas djupinfiltration för att höja grundvattennivån och därmed förhindra sättnings-skador och i mindre utsträckning för att förstärka grundvattentillgångar. I rapporten behandlas djupinfiltration med utgångspunkt från grundvattensänkning och sättningsproblem.

Det ökande samhällsutbyggandet har inneburit hårdgöring av mark i kombination med dränerande ingrepp som på flera håll medfört grundvattensänkningar. I områden med sättningskänsliga jordar exempelvis lerområden inom Stockholms- och Göteborgsregionerna har dessa grundvattensänkningar orsakat marksättningar med skador på byggnader, vägar, ledningar etc.

Djupinfiltration för att höja en avsänkt grundvattennivå måste i första hand ses som en metod att under begränsad tidsrymd motverka marksättningar och skador. Målet måste dock vara att genom tätningsåtgärder förhindra den dränering av grundvattnet som orsakar marksättningarna.

KAP 2.

De geologiska formationer som djupinfiltration vanligtvis utförs i karakteriseras av den senaste landisen och tiden efter denna. Berggrunden är eroderad till djupa dalar i svaghetszoner. Dessa dalar är idag täckta med ett tunt friktionsjordlager i botten som överlagras av lera. Leran är vanligtvis normalkonsoliderad varför en grundvattensänkning resulterar i en ökad belastning med sättningar i leran som följd.

De slutna akviferer som friktionsjordlagret utgör är små, begränsade och lågpermeabla varför mycket små läckage resulterar i stora sänkningar av grundvattentrycket.

KAP 3.

Vid utnyttjande av djupinfiltration i Sverige har en mängd erfarenheter vunnits om de problem som kan uppstå. Orsaker till problem och

brister i utförande och drift av djupinfiltrationsanläggningar kan sammanfattas i nedanstående punkter:

- Förundersökningar har utförts i begränsad omfattning vilket fått till följd att brunnar och borrhål ej placerats där de bästa förutsättningarna förelegat.
- Brunnar och borrhål har utformats bristfälligt.
- Brunnar och jordlager närmast dessa har med tiden satt igen p g a olämpligt infiltrationsvatten.
- Skötsel av brunnar och borrhål har varit bristfällig.
- Driftproblem har uppstått som ej uppmärksammats i tid vilket medfört driftstopp.

KAP 4.

För att kunna placera en infiltrationsbrunn på lämpligaste ställe krävs kännedom om

- grundvattensänkningens utbredning och storlek
- läge och utbredning av permeabla skikt under leran
- vattentransporterande egenskaper hos det permeabla lagret

Genom undersökningar som grundvattennivåobservationer, porttrycksmätningar, sonderingar för att bestämma jordlagrens mäktighet och sammansättning samt provpumpning och/eller provinfiltration kan sådan information erhållas att lämpligaste infiltrationsplats kan bestämmas.

Brunnar eller borrhål placeras där vatten kan tillföras ett permeabelt lager med största möjliga utbredning inom det område som skall påverkas. Infiltrationsplatsen bör inom detta område förläggas där grundvattensänkningens är störst. Inom många områden kan flera infiltrationsbrunnar eller borrhål behövas.

KAP 5.

En brunn måste dimensioneras med hänsyn till materialsammansättning i den formation där vatten skall infiltreras. En brunn i jord består av filter och förlängningsrör som båda skall utföras med hänsyn till naturliga förutsättningar och tekniska anordningar. Filtert består av dels ett filterrör med slitsar eller perforeringar

dels ett grusfilter eller formationsfilter som förhindrar material från formationen att transporteras in i brunnen.

Formationsfilter väljs då formationen består av ett osorterat material, dvs dess siktkurva är flack. Filtret utvecklas direkt från formationen genom rensumpning. Slitsarna i filterröret bör utformas som kontinuerliga.

Grusfilter väljs då materialet i formationen är sorterat. Filtret placeras utanför filterröret vid borrhingsarbetena och består vanligtvis av ett rent kvartsmaterial. Kornstorleken väljs från formationsmaterialets siktkurva. Slitsarna bör även i detta fall väljas som kontinuerliga på grund av det höga rensumpningskrav som gäller för infiltrationsbrunnar.

Infiltrationsflödet begränsas av att hastigheten i slitsarna ej får vara större än 0,03 m/s.

Det vattentryck som läggs över brunnen för att få ett visst infiltrationsflöde får ej vara för stort. Detta för att förhindra att det infiltrerade vattnet strömmar upp utmed röret till markytan.

Vid utförande av infiltrationsbrunn i jord bör det slitsade filterröret placeras ett stycke under den ovanliggande leran för att undvika att finmaterial kommer in i brunnens filter.

Brunnar i berg, dvs bergborrhål, utförs antingen från tunnlar eller bergrum eller från markytan. I det senare fallet kompletteras den vanligtvis en jordborrad brunn. I det förstnämnda fallet borrar hålen upp till det sprickiga ytberget utan att borrar ut i jord. För att kontrollera möjlig infiltrationskapacitet provtrycks borrhålet varannan meter. När tillräcklig kapacitet erhållits placeras en manschett som tätning i borrhålet mot tunneln. Borrhålen utförs vanligtvis med 51 mm:s diameter för att utnyttja den bergborrtröstning som normalt används vid bergarbete.

För att en brunn skall få maximal kapacitet måste den rensumpas innan den tas i drift. När en igensättning uppstår efter en tids drift måste den åter rensumpas. Rensumpning syftar till att ta bort den igensättning som uppstår närmast brunnen vid borrhningen

samt för att öka permeabiliteten närmast brunnen genom att ta bort fint material från formationen. Vid rensning skall en effektiv rens-pumpningsmetod utnyttjas, exempelvis manschett-pumpning eller jet-spolning. Dessa mekaniska metoder kan kompletteras med en kemisk rensning.

En djupinfiltrationsanläggning som skall kunna fungera under en längre tid måste planeras med hänsyn till praktiska förutsättningar som:

- tillförsel av infiltrationsvatten
- avledning av vatten vid rensningstillfällena
- elförsörjning
- åtkomlighet
- hänsyn till omgivande trafik och boende
- skydd mot åverkan

KAP 6

Som infiltrationsvatten utnyttjas vanligtvis kommunalt dricksvatten eller grundvatten från den dränerande anläggning som orsakat grundvattensänkning och behovet av djupinfiltration. Båda dessa vatten är vanligen mycket bra, trots detta orsakar de en med tiden ökande igensättning i brunnen och dess närhet.

Igensättningen beror på någon eller några av följande faktorer:

- Suspenderat material i infiltrationsvattnet avsätts i brunnsfiltret och jorden närmast brunnen.
- Gas eller luft, löst i eller tillfört infiltrationsvattnet avsätts i infiltrationsbrunnen eller formationen.
- Kemiska reaktioner mellan infiltrationsvattnet och grundvattnet som resulterar i voluminösa utfällningar. Speciellt vanligt är utfällning av järnhydroxid vid kontakten mellan ett järnrikt grundvatten och ett syrerikt infiltrationsvatten.
- Dispergering av lera i formationen.
- Mikrobiell aktivitet i brunnen eller brunnsfiltret.

Igensättning kan motverkas genom behandling av infiltrationsvattnet och åtgärdas genom rens-pumpning. Igensättningen får aldrig bli så

stor innan rensning att mer än hälften av infiltrationsflödet förloras vid konstant infiltrationstryck. Rensning bör dock utföras minst en gång om året.

I varje enskilt fall är risken för och konsekvensen av en igensättning beroende på lokala förhållanden. Som tumregel för att motverka igensättning kan följande råd ges:

- Igensättning på grund av partiklar i infiltrationsvattnet sker alltid, men beroende på mängd och egenskaper hos partiklarna sjunker infiltrationsflödet olika snabbt. Igensättningshastigheten kan minskas genom att vattnet filtreras genom t ex filterpatroner. En redan uppkommen igensättning kan rensas bort. Genom att pröva sig fram kan en nödvändig grad av filtrering utprovas för att minska antalet rensningstillfällen.
- Gas eller luft får ej förekomma i vattnet i större mängd än mättnadsvärdet för rådande tryck och temperatur i akviferen. I annat fall måste vattnet avluftas.
- Kemiska reaktioner som medför utfällningar, ger en igensättning som bör rensas bort. Infiltrationsvattnet kan också behandlas så att utfällning minskas t ex genom en pH-justering.
- Urlakning och svällning av lera i formationen kan förhindras genom att natriumadsorptionstalet, SAR, på infiltrationsvattnet, ligger inom vissa gränser. Justering av infiltrationsvattnets sammansättning kan bli nödvändig och utförs genom att dess salthalt förändras i sådan grad att det motsvarar det ursprungliga grundvattnets sammansättning eller rekommenderade värden på SAR.
Om igensättning till följd av dispergering har skett bör kalciumklorid tillsättas infiltrationsvattnet tills infiltrationsflödet stigit till normala värden. En igensättning av dispergerad lera är svår att rensa bort.
- Mikrobiell aktivitet kan reduceras genom chockklorering i kombination med mekanisk rening. Igensättningen kan undvikas genom att ett kloröverskott upprätthålls i infiltrationsvattnet.

Igensättning av infiltrationsbrunnar kan vanligen undvikas eller minimeras genom att infiltrationsvattnets sammansättning förändras.

Generellt bör det vatten som infiltreras i en akvifer ha liknande sammansättning som det ursprungliga grundvattnet. Dessutom bör kemikalier inte tillföras infiltrationsvattnet som inte naturligt förekommer i akviferen och som kan påverka jordlagrens sammansättning och struktur.

KAP 7.

Noggrann driftskontroll är nödvändig för att snabbt kunna åtgärda brister hos infiltrationsanläggningen eller i infiltrationens utförande. Regelbundet återkommande observationer måste göras för att bedöma effekten av infiltrationen, dvs areal påverkan, grundvattennivåns och porvattentryckets tidsförlopp samt sättningsarnas avtagande. Generellt kan följande schema följas:

- 1 gång/vecka bör observationer göras av infiltrationstryck, flöde, installationernas funktion samt grundvattennivå, i brunnens närhet.
- 1 gång/månad bör sättningsmätningar samt observationer av grundvattennivå och portryck utföras.
- 1 gång/år (minst) bör brunnen rensas och ventiler och mätare rengöras.

Det kan inte nog poängteras vikten av en regelbunden tillsyn. Många avbrott i driften kan undvikas genom att fel eller brister upptäcks i tid.

KAP 8.

Kostnaderna för en djupinfiltrationsanläggning beror delvis av lokala förhållanden. Vissa riktlinjer anges dock för anläggning, skötsel och underhåll. Härav framgår att driftkostnaderna utgör den tyngsta posten framför anläggningskostnaden. Det lönar sig därför inte att spara in på den senare då en bristfälligt utförd brunn kan ge förhöjda driftkostnader.

1. VARFÖR DJUPINFILTRATION

1.1 Vad är djupinfiltration?

Med djupinfiltration förstås vattentillförsel till berg eller jordlager genom borrhål eller brunnar. Begreppet infiltration används inom hydrologin för att beskriva vattnets nedträngande i jord eller berg medan begreppet perkolations beskriver vattnets vertikala rörelse ned till grundvattenytan.

Djupinfiltration kan även benämnas kontrollerad grundvattenbildning via brunnar eller berghål. I engelskt språkbruk används uttrycken "injection" eller "artificial recharge through wells".

1.2 När används djupinfiltration?

I Sverige utnyttjas djupinfiltration vanligtvis för att höja en avsaknad grundvattennivå och för att förstärka en grundvattentillgång. I föreliggande rapport behandlas djupinfiltration i samband med höjning av grundvattennivå för att motverka sänkningar.

I samband med byggande i Sverige har sänkningar av grundvattennivå i såväl berg som i jord observerats. Orsaken till dessa sänkningar har varit

- o dränering på grund av t ex djupa schakter, ledningsgravar eller anläggningar i berg.
- o minskad grundvattenbildning till följd av förändrad markanvändning t ex hårdgöring.

De största avsänkningarna orsakas vanligen av djupt liggande dräneringar under grundvattenytan. I områden med lös lera har dessa grundvattensänkningar medfört marksänkningar och orsakat skador på byggnader, vägar och ledningar.

Problemen grundvattensänkning - marksänkningar har under de senaste 10-15 åren ökat till följd av att berget i allt högre grad utnyttjats inom och i anslutning till bebyggda eller planerade områden. Varje år byggs i Sverige tunnlar för vatten, dagvatten, avlopp, fjärrvärme, el, tele och kommunikation till en längd av ca 80 km. Flertalet av dessa tunnlar anläggs i regioner med sättningskänsliga jordar, exempelvis lerområden i Stockholms- och Göteborgsregionerna.

Djupinfiltration är en metod att motverka dessa grundvattensänkningar orsakade av djupliggande dränering under grundvattennivån men den måste i första hand ses som en metod att under begränsad tid upprätthålla en grundvattennivå. På sikt måste i stället läckagen till anläggningarna reduceras genom tätande åtgärder. I Sverige utnyttjas sedan 10 år djupinfiltration, och idag finns sammanlagt ca 50 infiltrationsbrunnar i drift.

Djupinfiltration kan också utnyttjas i andra sammanhang, exempelvis för att

- magasinera eller utnyttja energi i grundvatten
- förhindra saltvatteninträngning i kustnära områden
- driva ut olja och ersätta olja med vatten
- deponera icke önskvärt vatten

Djupinfiltration får inte förväxlas med ytinfiltration exempelvis perkolationsmagasin, där vatten tillförs grundvattenmagasinet från markytan. Ytinfiltration är i första hand avsedd att motverka minskad grundvattenbildning till följd av hårdgöring.

1.3 Bakgrund till rapporten

Sedan slutet av 1960-talet har djupinfiltration praktiserats i Sverige inom ett flertal projekt där syftet varit att återställa en avsänkt grundvattennivå. De erfarenheter som vunnits under åren har i stort varit positiva men har indikerat vissa svårigheter. Framför allt har det visat sig svårt att upprätthålla en återställd grundvattennivå under längre tid.

Genom studier och erfarenheter har spridda kunskaper om hur djupinfiltration bör utföras växt fram inom landet. Ett behov av att sammanställa dessa kunskaper medförde att en arbetsgrupp bestående av representanter för konsultbranschen, myndigheter och forskningsinstitutioner tillsattes av byggforskningsrådet (BFR). Arbetsgruppen fick som uppgift att "utforma praktiskt tillämpbara rekommendationer för utförande av djupinfiltration". Föreliggande arbete utgör arbetsgruppens redovisning.

2. HUR ÄR FÖRUTSÄTTNINGARNA FÖR DJUPINFILTRATION

2.1 Naturliga geohydrologiska förhållanden

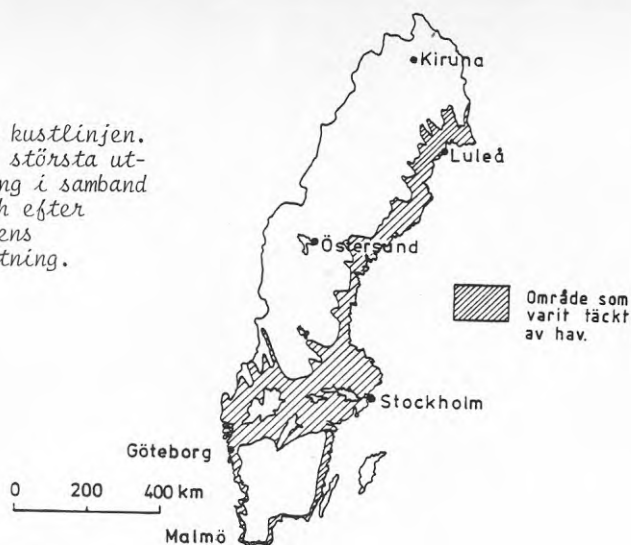
De geologiska förhållandena i Sverige är i huvudsak präglade av de geologiskt sett mycket unga avlagringar som bildades under och i samband med den senaste landisens avsmältning samt under den period då delar av landet därefter var täckt av vatten. Dessa avlagringar vilka utgör våra jordarter täcker en berggrund som till 95% består av kristallina bergarter. Grundvattenförekomster i berggrunden är helt och hållet förknippade med sprickor, förkastningar, kross-zoner etc.

Genom landisens eroderande inverkan har svaghetszoner i berggrunden kommit att fördjupas och bildar nu i flertalet fall dalgångar och lågpartier i vårt landskap. Speciellt utpräglad är detta för de svaghetszoner som har en riktning som sammanfaller med landisens rörelseriktning. De lägre delarna av dalgångarna är vanligen fyllda med kvartära avlagringar, jordarter. I samband med och efter landisens avsmältning var stora delar av landet täckt av vatten, FIG 1. Under denna tid avsattes finkorniga jordarter i form av leror och siltjordar i dessa områden. De understa, och därmed också de äldsta delarna av dessa avlagringar innehåller vanligen inslag av grövre material, som silt och sand. I dessa delar förekommer på vissa ställen en varvighet eller skiktning, orsakad av variationerna i smältvattenflöden från landisen.

Sammanfattningsvis kan sägas att lerorna är homogena, utom i sina understa delar där mer eller mindre väl utbildade skikt av grövre material ofta förekommer. Det bör emellertid poängteras att leror direkt kan överlagra berg eller morän.

Lerorna är idag konsoliderade med hänsyn till de geologiska förhållanden som råder eller rått från tiden för dess bildande och fram till nutid. Således är lerorna i allmänhet normalkonsoliderade eller svagt överkonsoliderade. En belastning i form av en vattentryckssänkning kan därför resultera i att förkonsolideringstrycket överskrids och en sättning inträffar.

FIG 1. Högsta kustlinjen.
Havets största ut-
bredning i samband
med och efter
landisens
avsmältning.



En sektion genom en sedimentfylld dalgång i västra Sverige illustreras schematiskt i FIG 2a. De grovkornigare jordlagren närmast berggrunden har i vissa områden kontakt med markytan via dalsidorna men i andra områden saknas denna kontakt. I östra Sverige är friktionslagret vanligtvis mäktigare och står vanligtvis i direkt kontakt med markytan, FIG 2b. Grundvattnet som förekommer i dessa permeabla lager har en nivå som i allmänhet ligger i nivå med markytan. Grundvattnet i friktionsjordens närmast berggrunden i naturligt tillstånd har vanligtvis en nivå som ligger över lagrets övre begränsning gentemot leran. En sådan vattenförande formation kallas sluten akvifer.

I en sluten akvifer gäller vanligtvis att små vattenvolymsförändringar orsakar stora vattennivåförändringar. Den areella utbredningen av en vattennivåförändring blir förhållandevis stor, och beror av det vattenförande lagrets mäktighet, kontinuitet och permeabilitet.

Grundvattnet bildas vid dalens sidor där friktionsjordlagret går upp till markytan eller via berggrunden. En mycket liten tillförsel kan ske som läckage genom leran.

Portrycket i leran överensstämmer i allmänhet med grundvattennivån i den slutna akviferen. I lerlagrets övre delar varierar dock porvattentrycket beroende på klimat och nederbörd.

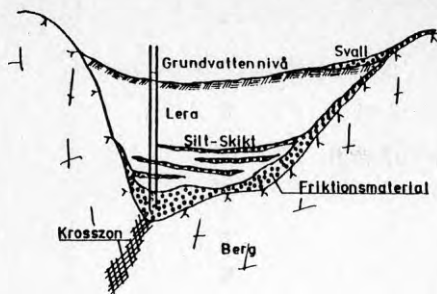


FIG 2 a. Schematisk sektion genom en sedimentfylld dalgång i västra Sverige.

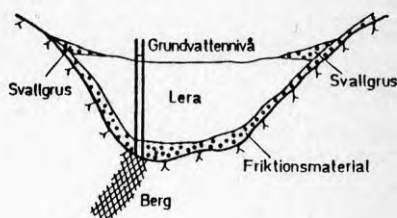


FIG 2 b. Schematisk sektion genom en sedimentfylld dalgång i östra Sverige.

Den svaghetszon i berggrunden som åskådliggörs i den i FIG 2 illustrerade dalgångens botten kan vara vattenförande. Vattentrycket i denna överensstämmer i naturligt opåverkat tillstånd vanligtvis med grundvattennivån i den slutna akviferen.

2.2 Störningar av grundvattenförhållanden

Grundvattennivån i berg och friktionslager kan avsänkas genom dränerande ingrepp direkt i akviferen eller via spricksystem i berget. Dessa ingrepp kan vara djupa schakter, ledningsgravar samt anläggningar i berg. Avsänkningar medför en förändring av vattentrycksförhållanden i leran. I FIG 3 illustreras vattentrycksförhållandena i leran under naturliga opåverkade betingelser, efter en grundvatten-sänkning i det djupt belägna friktionslagret samt förhållandena i samband med djupinfiltration.

Medan grundvattenavsänkingsförloppet i friktionsjordlagret är snabbt (dygn) är motsvarande tryckförändringsförlopp i lerlagret långsamt (månader - år) och beror bland annat på lerans konsolideringsgrad och förekomsten av permeabla skikt av t ex silt.

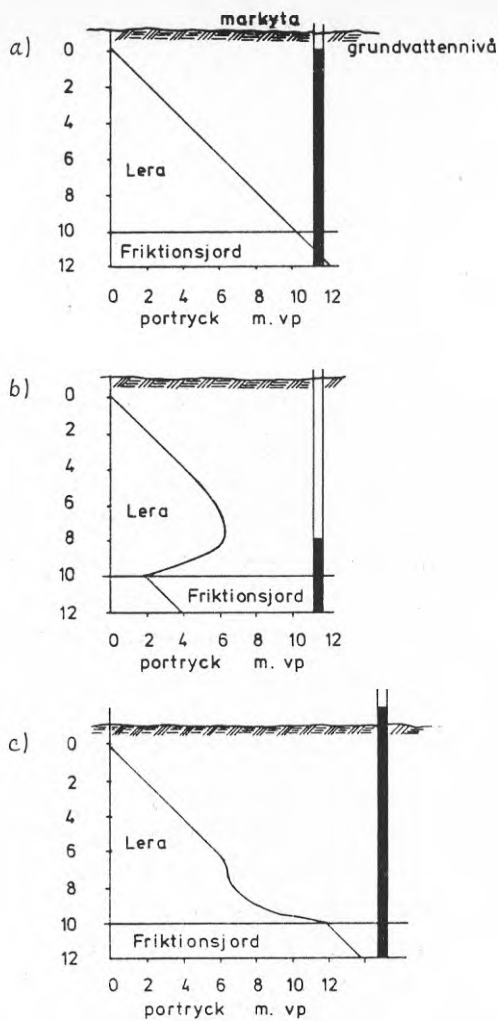


FIG 3. Exempel på portryck i lera vid naturliga opåverkade förhållanden (a) vid en viss tid efter en grundvattensänkning av 8 m (b) samt efter en tids djupinfiltration (c).

2.3 Hur fungerar djupinfiltration teoretiskt?

Den snabbaste avsänkningen av vattentrycket i en jordprofil sker i de mest permeabla lagren närmast den störning som orsakar vattentrycks-sänkningen. På motsvarande sätt gäller att den snabbaste tryckökningen kan erhållas genom att infiltrera vatten i dessa lager. Principen för djupinfiltration är således att genom brunnar i berg eller jord tillföra vatten till dessa permeabla lager. Den areella påverkan av en djupinfiltration kan sägas vara proportionell mot jordlagrets permeabilitet enligt

$$R_0 = \sqrt{t \cdot \frac{k \cdot H}{S} \cdot 2.25}$$

- där R_0 = den radiella utsträckningen av det påverkade området, influensradie (m)
 t = tid efter infiltrationsstart (s)
 k = akviferens permeabilitet (m/s)
 H = akviferens mäktighet (m)
 S = akviferens magasinskoefficient

(Definitioner av utnyttjade termer framgår av bilaga 1.)

Lera har en permeabilitet av ca 10^{-10} m/s och friktionsjord där djupinfiltration vanligtvis utförs i en permeabilitet av ca 10^{-4} m/s. Detta innebär att infiltration i kontinuerliga permeabla jordlager har en radiell påverkan som är ca 1 000 ggr större än infiltration i ett lerlager enligt ovan angivna formel.

2.4 Hur förändras portrycket vid djupinfiltration?

Principen för djupinfiltration är att genom snabb tryckökning i lerans omgivning dvs i underliggande permeabla jordlager häva en portrycksänkning i överlagrande lerlager. Inom en något längre tidsrymd kan portrycket därefter höjas genom vertikal strömning från friktionslagret till lerlagret, som illustreras av Fig. 4.

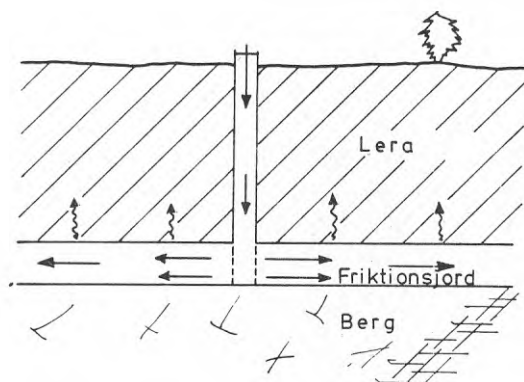


FIG 4. Principen för vattenströmning från friktionslager till lerlager vid djupinfiltration.

När en lera belastas följer den en deformationskurva illustrerad i FIG 5.

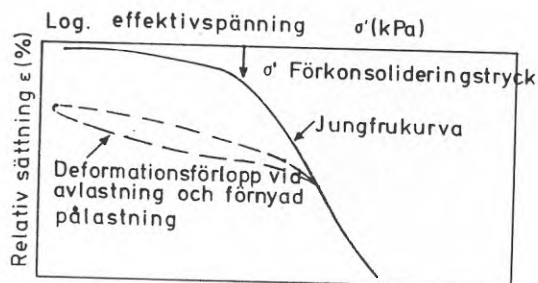


FIG 5. Konsolideringsförloppet i en lera.

Upp till rådande förkonsolideringstryck sker huvudsakligen elastiska deformationer, varefter plastiska deformationer längs den s k jung-

frukurvan dominerar. Om leran avlastas återfjädrar denna genom elastiska deformationer och vid förnyad pålastning deformeras leran som om ett nytt förkonsolideringstryck motsvarande den tidigare maximala effektivspänningen rått. Vid deformationen avger leran vatten motsvarande den porositetsminskning som kompressionen medför. Då leran har låg permeabilitet tar kompressionen lång tid. Detta medför att en pålastning i ett inledningskede till största delen tas genom en ökning i portrycket och först då vattnet avgår överförs lasten på leran, se FIG 6.

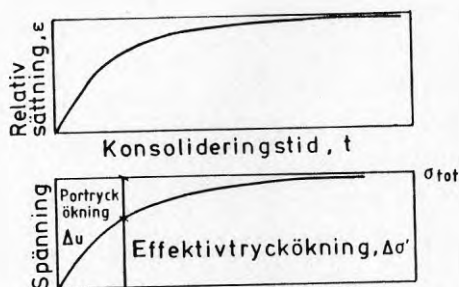


FIG 6. Tidsförlopp för konsolidering och effektivtryckökning.

En sänkning av grundvattennivån i en akvifer under lera medför att det uppstår en nedåtriktad hydraulisk gradient i lerans undre del. Detta medför i sin tur att porvatten utdrives och en del av jordlagrets tyngd överförs till kornskelettet, som deformeras och ger sättningar. Som nämnts tar detta förlopp en avsevärd tid då leran har låg permeabilitet.

Om trycket i akviferen höjs genom djupinfiltration blir förloppet det motsatta, dvs det uppstår en uppåtriktad gradient i underkant lerlager och en vattenström som höjer portrycket och avlastar kornskelettet. Återfjädringen och således även volymökningen är dock obetydlig, se FIG 5. Detta får till följd att endast små vattenmängder åtgår och följaktligen blir tryckökningen snabb.

Sammanfattningsvis kan sägas att portryckssänkning och konsolidering är en långdragen process, medan en höjning av portrycket i akviferen till ursprunglig nivå snabbt slår igenom i jordprofilen. Detta förhållande är gynnsamt för resultatet av djupinfiltration.



3. VILKA ÄR DE TEKNISKA PROBLEMEN I SAMBAND MED DJUPINFILTRATION

Erfarenheter av djupinfiltration för att höja en avsänkt grundvattennivå har varit goda även om problem förekommer som i vissa fall kan begränsa metodens effekt. De vanligaste problemen kan sammanfattas i nedanstående fem punkter.

- Bristfälliga förundersökningar av geologi och grundvattenförhållanden, vilket medfört att infiltrationsbrunnar ej placerats där bästa förutsättningar föreligger. Detta har inneburit att infiltrationsflödet från början blivit lågt och endast ett mindre område har kunnat påverkas.
- Bristfälligt utformade brunnar.
- Igensättning av infiltrationsbrunn och jordlager kring denna.
- Bristfällig skötsel av infiltrationsbrunn, t ex sällan förekommande rensning.
- Driftproblem, t ex dåligt fungerande installationer.

I följande kapitel diskuteras orsaker till och åtgärder mot de nämnda problemen.

Andra icke önskbara effekter orsakade av djupinfiltration kan uppstå eller har påvisats i enstaka fall, t ex urspolning av material längs vattnets strömningsväg med påföljande hålrumsbildning och marksättning. Under avsnitt 6.25 poängteras effekten av urlakning av saltvattenavsatt lera genom infiltration av ett saltfattigt vatten. Denna process påverkar även lerans hållfasthet och stabiliteten kan försämrats eller sättningar uppstå.

4. HUR VÄLJS INFILTRATIONSPLATS

4.1 Kriterier på infiltrationsplats

Djupinfiltration syftar till att inom ett bestämt område höja grundvatten och portryck till en önskad nivå. Platsen för djupinfiltration väljs med hänsyn till detta syfte. Det är av stor vikt att platsen väljs utifrån följande villkor.

- Infiltrationsbrunn(ar) skall ha kontakt med det permeabla lager inom vilket grundvattennivån är avsänkt.
- Platsen skall ligga inom det område där höjda vattennivåer önskas. I detta område skall platsen förläggas där grundvattenavsänkningen är störst, dock ej direkt i läckagepunkten.
- Infiltrationen bör ske där tranmissiviteten är så hög som möjligt för att få största möjliga areella påverkan.

Val av bra infiltrationsplats kräver noggranna geologiska och hydrogeologiska undersökningar. Kontinuitet av permeabla lager måste fastställas liksom utbredning och omfattning av grundvattensänkning.

Skikt av silt och finsand inom en lera kan i flera fall utnyttjas för att med små vattenmängder få stor lokal effekt på grundvattentrycket men med begränsad areal utbredning.

I FIG 7 visas det teoretiska sambandet mellan radiell utsträckning av påverkat område och transmissivitet efter en veckas infiltration. Vid små transmissiviteter erhålls begränsad påverkan vid infiltration genom en brunn. I FIG 8 visas infiltrationsflöde och i FIG 9 infiltrationstryck vid olika transmissiviteter som behövs för att erhålla en tryckhöjning av 3 m på 20 m avstånd från en infiltrationsbrunn. I formlerna anges tiden i sekunder.

Diagrammen är konstruerade att gälla under mycket ideella förhållanden men kan tjäna som en handledning inför val av infiltrationsplats med hänsyn till bland annat transmissivitet.

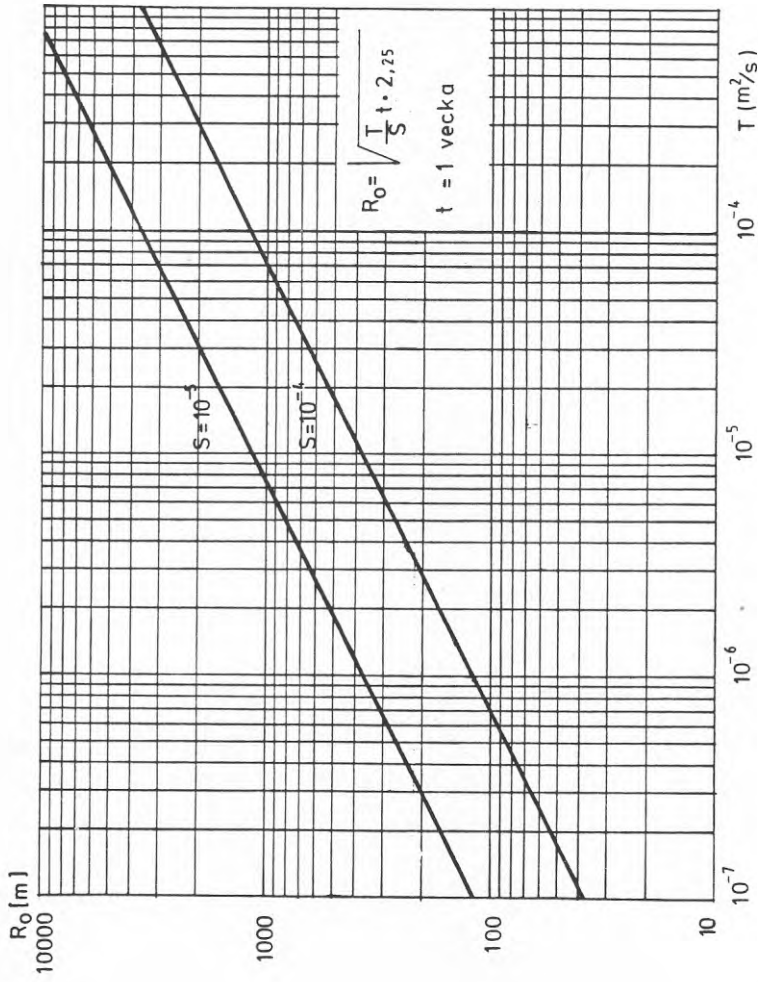


FIG 7. Teoretiskt samband mellan inflyensradie (R_0) och transmissiviteten (T) efter en veckas infiltration vid olika värden på magasinshoefficienten (S).

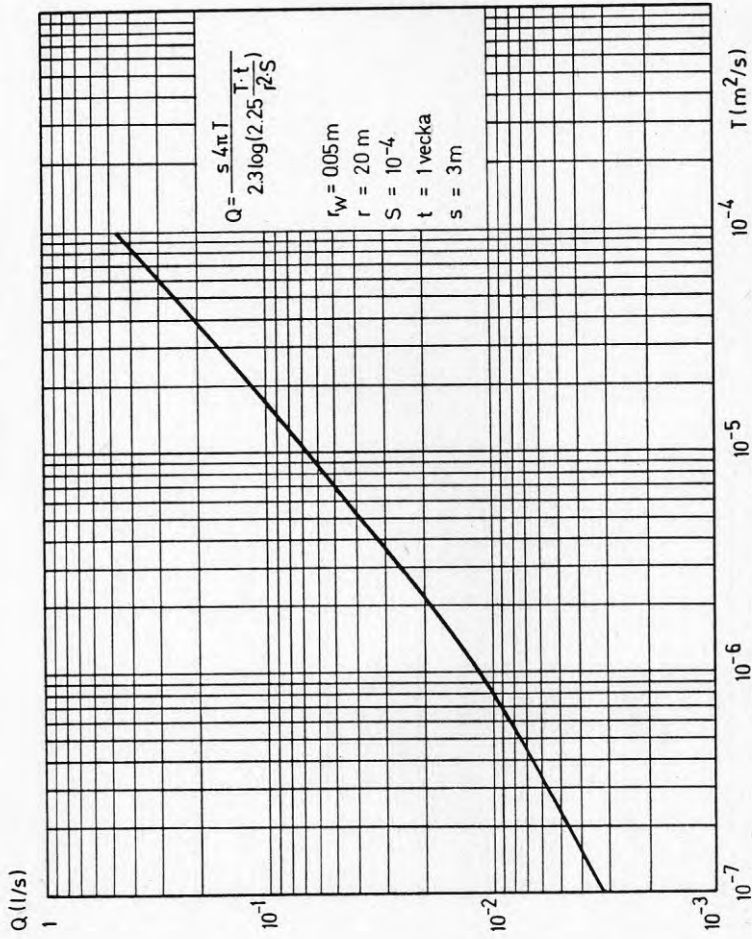


FIG 8. Teoretiskt samband mellan infiltrationsflöde (Q) och transmissiviteten vid i övrigt angivna villkor.

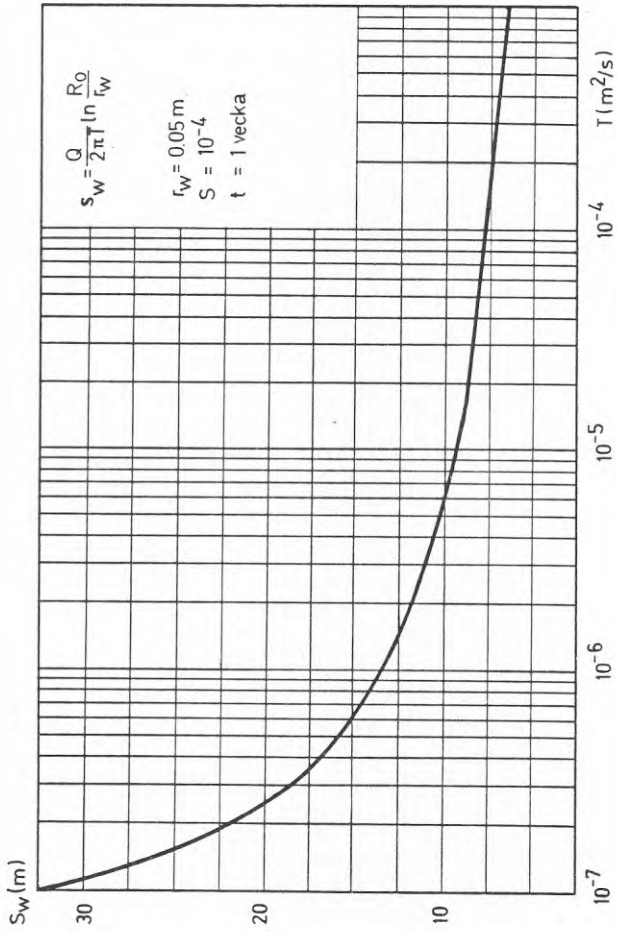


FIG 9. Teoretiskt samband mellan infiltrationsstryck (s_w) och transmissiviteten vid i övrigt angivna villkor.

För att belysa hur diagrammen i FIG 7, 8 och 9 utnyttjas ges följande exempel:

- 1 Vid en transmissivitet $T = 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ erhålles en teoretisk areal påverkan $R_0 = 1200 - 3600 \text{ m}$. Samma transmissivitet ger enligt FIG 8 ett erforderligt infiltrationsflöde $Q = 0,46 \text{ l/s}$ och enligt FIG 9 ett infiltrationstryck $s_w = 7,4 \text{ m}$.
- 2 Vid en transmissivitet $T = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ erhålls en areal påverkan $R_0 = 120 - 360 \text{ m}$ vilket innebär att ett stort antal infiltrationsbrunnar krävs för att påverka grundvattennivån inom samma område som i exempel 1. På motsvarande sätt som ovan erhålls infiltrationsflödet $Q = 0,01 \text{ l/s}$ och $s_w = 13,2 \text{ m}$. Detta infiltrationsstryck är något högt med tanke på risken för erosion.

I de flesta fall är en vecka för kort tid för att bedöma effekten av infiltrationen. En månad bör kanske vara en mer rimlig tid. Exempelen ovan syftar dock enbart till att åskådliggöra hur de angivna diagrammen kan användas. Genom att sätta in en annan tid (t) i de angivna ekvationerna kan nya kurvor erhållas.

I de angivna exemplen tas ingen hänsyn till att områdena vanligtvis är hydrauliskt begränsade. Ingen hänsyn är heller tagen till att läckaget till den dränerande anläggningen kan öka då grundvattennivån stiger i området.

För att klarlägga förhållandet mellan tryckhöjning och infiltrationsflöde inom ett bestämt område kan en provinfiltration vara till god hjälp, se avsnitt 4.2.6.

Vid infiltration via bergborrade brunnar är det svårt att utan förundersökning förutsäga avståndet mellan varje infiltrationspunkt. Detta kan variera mellan 30 och 200 meter, beroende på såväl de ovanliggande jordlagrens mäktighet och vattenförande förmåga som själva berggrundens sprickighet och permeabilitet.

4.2 Undersökningsmetoder

4.2.1 Vad skall undersökas?

Följande faktorer skall undersökas i samband med val av infiltrationsplats.

- djup till berg
- jordlagerföljd
- jordlagrens utbredning och mäktighet
- jordlagrens vattengenomsläpplighet, permeabilitet
- grundvattennivåer i tid och rum
- portryck i tid och rum
- bergets sprickighet

En del av dessa faktorer kan ha undersökts i samband med projektering av den anläggning, som orsakat grundvattensänkningen och behovet av djupinfiltration. I det följande beskrivs kortfattat de hjälpmedel och metoder som står till buds för att undersöka de ovannämnda faktorerna.

4.2.2 Översiktliga undersökningsmetoder

Värdefulla uppgifter om geologiska förhållanden av mera översiktlig natur kan erhållas dels från geologiska, topografiska och ekonomiska kartor, dels genom egen tolkning av flygbilder och genom fältbesiktning.

4.2.3 Bergdjupsbestämning

För en översiktlig kartläggning av bergnivå kan geofysiska metoder - vanligen refraktions-seismik - med fördel tillämpas. Vid en seismisk mätning registreras gånghastigheten för en tryckvåg på olika nivåer, och resultaten sammanställs i en profil. Då gånghastigheten är beroende av materialets täthet kan gränsen mellan jord och berg i regel urskiljas. Noggrannheten för djupbestämning brukar vara $\pm 10\%$. För att alstra en tryckvåg används vanligen sprängladdningar vilket kan begränsa möjligheten att använda seismik inom tätbebyggda områden. Denna metod måste kompletteras med jord-bergsondering för att fastlägga några säkra punkter på den seismiska profilen.

För säker punktbestämning av bergytan används vanligen jord-bergsondering, dvs sondering med bergborrtröstning. Denna möjliggör borrning genom förekommande block respektive i berg till önskat djup. Samtidigt kan sjunkningshastigheten registreras, och därvid erhålles en indikation på jordlagrens fasthet och bergets kvalitet.

En mindre säker - men betydligt billigare - djupbestämning kan uppnås med lätt sonderingsutrustning som sticksond, slagsond, trycksond, viktsond och hejarsond. Frånsett sticksonden ger dessa metoder även möjlighet att registrera neddrivningsmotståndet och därmed jordlagrens relativa fasthet. En van borrhledare kan dessutom av olika indikationer avgöra om borren passerar friktionsjord. Gemensamt för all lätt sondering är att den stoppas av stor sten och block - och har begränsad nedträngning i hårda jordlager, t ex morän.

Vanligen är det av intresse att i en lera undersöka förekomst av tunna lager eller skikt av friktionsmaterial. Detta kräver känsliga metoder, då skikten kan ha en mäktighet av endast någon eller några centimeter. Vid trycksondering - speciellt då spetskraften mäts direkt - visar sig sådana skikt vanligen genom ett högre borrhmotstånd. En annan metod är sk portryckssondering, som registrerar förekomst av vattengenomsläppligt material vid neddrivningen.

4.2.4 Provtagning

För närmare analys av jordarterna kan prov tas med olika typer av provtagare. Man brukar skilja mellan störda och ostörda prov, varvid de ostörda förutsättes ha sin kornstruktur och övriga egenskaper i det närmaste intakta. Det är i huvudsak i kohesionsjordar som störda prov kan tas, och då används vanligen kolvprovtagare eller - om kontinuerliga prov önskas - folieprovtagare.

Störda prov av leror har vid provtagningen blivit så omrörda att jordartens naturliga egenskaper som skjuvhållfasthet, sensitivitet, permeabilitet och kompressibilitet ändras. Däremot kan exempelvis kornfördelning, kornform, organisk halt och vattenhalt bestämmas även på störda prov. Störda prov av friktionsjordarter medger bestämning av permeabilitet.

För störd provtagning finns flera typer av utrustning, varav de vanligaste är:

- spadprovtagare, maxdjup ca 5 m (endast över grundvattenytan)
- skruvprovtagare, maxdjup ca 10 m (" " ")
- kannprovtagare, gruskannborr
- provtagningsspets
- rördrivning med uppblåsning (uppspolning) av material

Gemensamma nackdelar för dessa provtagare är att den upptagna jordvolymen är förhållandevis liten med undantag av rördrivning med uppblåsning, att stenar över 20-30 mm storlek ej följer med, och att en viss risk för blandning av jord från olika nivåer föreligger. På små djup - max 5-6 m - uppnås den bästa provtagningen i grävda gropar.

4.2.5 Grundvatten- och portryckmätning

I samband med projektering av en anläggning under grundvattennivån skall grundvattenförhållandena alltid noggrant undersökas. Inom området där en djupinfiltration övervägs, kan det därför redan föreligga uppgifter om grundvattennivån. Vanligen får dessa kompletteras för att ge ett bättre bedömningsunderlag.

Mätningarna kan sägas vara av tre olika typer. Den enklaste är bestämning av vattenytan i ett öppet hål i jorden. Denna nivå kallas ibland den övre grundvattennivån som illustreras i FIG 10.

På större djup i jordlagren kan grundvattnets trycknivå avvika från den övre grundvattennivåns. Framför allt i lerlager, där genomsläppligheten är låg, kan sådana avvikelser förekomma. För att mäta det rådande trycket på en viss nivå i en lera krävs särskilda portrycksmätare. Av dessa finns flera modeller, men gemensamt för alla är att de kräver en liten vattenmängd för att kunna mäta tryckvariationer. Grundvattentrycket - portrycket - i ett lerlager mäts vanligen på flera nivåer för att få fram en sammanhängande profil.

Den tredje mätmetoden för grundvattennivå tillämpas i mera genomsläppliga jordlager, och kan i sin enklaste form vara ett öppet rör neddrivet till aktuell nivå. För att hindra inträngning av jord, förses röret vanligen med en perforerad spets av 0,5-1,0 m längd. Avläsning sker genom att vattenytan i röret pejlats, och denna vattenyta motsvarar den undre grundvattenytan, se FIG 10.

4.2.6 Provinfiltration

Genom olika förundersökningar försöker man finna lämpligaste plats och utformning för en djupinfiltrationsbrunn. För att vinna tid väljer man i praktiken ofta att göra prov i fält, innan den teoretiska bakgrunden är helt klarlagd.

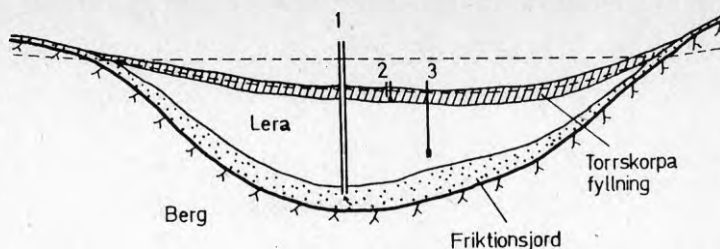


FIG 10. Sektion utvisande

1. Rör för mätning av grundvattentryck i det undre grundvattenmagasinet.
2. Rör för mätning av den övre grundvattennivån.
3. Porvattentryckmätare för mätning av porvattentrycket i lera.

Enklast går detta till så att man kopplar vattentillförsel till något befintligt observationsrör för grundvatten eller till undersökningsspetsen genom vilken jordprov tas upp för att dimensionera brunnen. Under tiden som provet pågår, mäts vattenåtgång och infiltrationsstryck, samt trycknivån i omgivande observationsrör. Vid infiltrationsförsökets start bör man infiltrera med ett vattentryck i brunnen i nivå med markytan. Försöket bör fortgå tills respons erhålls. Grundvattenförändringar i omgivande grundvattenrör mäts kontinuerligt. Om ingen respons erhålles inom en vecka är den valda infiltrationsplatsen inte lämplig och en ny plats bör studeras. Om respons erhålles men inte i erforderlig grad bör infiltrationsförsöket fortsätta ytterligare en tid. Eventuellt kan trycket i brunnen ökas till några meter över markytan beroende på brunnens djup. Det bör nogas tillses, att infiltrationstrycket vid provet inte sätts för högt, då vattnet därvid kan finna läckvägar, som sedan är svåra att täppa till.

Under hela försöket måste infiltrationsflödet nogas observeras. Även läckaget till bergrum e dyl bör studeras då vatteninläckningen kan öka då grundvattentrycket stiger.

Om man efter en månads provinfiltration inte erhåller tillräcklig effekt på grundvattennivåerna bör infiltration utföras över flera infiltrationsbrunnar. De ytterligare brunnarna placeras inom det område där försöket gett dålig effekt på grundvattennivåerna.

5. HUR UTFÖRS DJUPINFILTRATIONSANLÄGGNINGEN

5.1 Vad består en djupinfiltrationsanläggning av?

En anläggning för djupinfiltration består av följande delar:

- Pump och ledningar för att tillföra vatten till brunn eller borrhål.
- Brunn eller borrhål för att leda vatten till den nivå där det skall infiltreras.
- Installationer för brunn/borrhål. Manometer för att kontrollera infiltrationstryck och vattenmätare för att kontrollera infiltrerad vattenmängd samt tappkran för att möjliggöra kontroll av infiltrationsvattnets sammansättning.
- Säkerhetsinstallationer som avstängningsventil och backventil.
- Installationer för att kunna förändra infiltrationsvattnets sammansättning om så erfordras.
- Brunn/borrhål skyddas t ex i nedgrävda cementringar, i intilliggande fastighet eller i arbetarbod. Vid infiltration från tunnel placeras anläggningar i nischer i tunneln så att de ej utgör hinder för övrig verksamhet.

I följande avsnitt diskuteras hur de ingående delarna i en anläggning dimensioneras och utformas. I avsnitt 5.5 ges exempel på utformning av två olika anläggningar.

5.2 Hur dimensioneras en djupinfiltrationsbrunn?

5.2.1 Teoretisk bakgrund

En brunn avsedd för djupinfiltration dimensioneras med hänsyn till vattenmängd och typ av akvifer. Dimensioneringen stämmer i många hänseenden överens med dimensionering av uttagsbrunnar. I det följande redovisas teoretiska betraktelser vad avser brunnshydraulik som i första hand är giltiga för brunnar i porösa medier, dvs brunnar i jord. För brunnar borrhåda i urberg gäller att frekvens och öppenhet hos förekommande sprickor är avgörande för brunnarnas kapacitet.

En brunn består av brunnsrör och filter och den kallas för rörbrunn i de fall vatten strömmar horisontellt från eller till densamma. Brunnsröret indelas vanligen i filterrör, där vattenutflödet från brunnen sker, förlängningsrör upp till markytan och sumprör under

filterröret i det fall detta förekommer, se FIG 11. Filterröret omges av ett filter som förmedlar jordtrycket mellan akvifer och filterrör och förhindrar material från formationen att vandra in i brunnen. Filtret kan genom renspumpning utvecklas direkt ur akviferen, formationsfilter, eller placeras dit under borrhingsarbetena, grusfilter, se FIG 11.

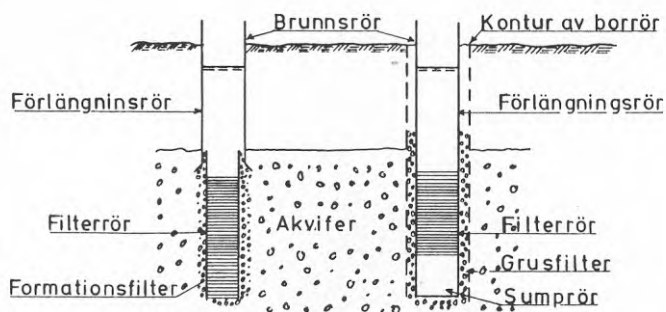


FIG 11. Olika typer av rörbrunnar.

En rörbrunn vars filterdel täcker hela akviferen sägs vara fullständig, i annat fall ofullständig brunn, se FIG 16.

En enklare typ av rörbrunnen är spetsrörbrunnen. Denna brunn har vanligen liten diameter (max ca 100 mm) och i motsats till övriga rörbrunnar drivs den direkt ned i formationen medelst exempelvis hejare och ett formationsfilter utvecklas genom renspumpning, se FIG 12.

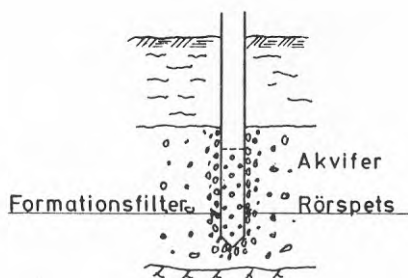


FIG 12. Spetsrörbrunn.

Flödes- och vattentrycksförhållanden kring en brunn styrs dels av brunnens konstruktion, dels av akviferens egenskaper. Vid redogörelse för hur en brunn fungerar används ett flertal begrepp. Förklaring av dessa begrepp framgår av ordlista, bilaga 1.

Trots att de förlopp som sker vid uttag eller infiltration på en brunn till sin karaktär är transienta (tidsberoende) kan man vid dimensionering av en brunn ofta nöja sig med att utföra beräkningarna för stationära (icke tidsberoende) förhållanden.

Under isotropa stationära förhållanden blir höjningen s av vattennivån (vattentryck) på ett avstånd r från en infiltrationsbrunn (FIG 13):

$$h - h_0 = s = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{R_0}{r} \quad (\text{Thiems brunnsekvation})$$

där h = grundvattennivån på avståndet r från brunnen

h_0 = grundvattennivån på avståndet R_0

R_0 = influensradien

Q = infiltrationsflöde

T = transmissiviteten

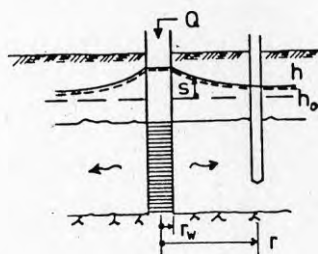


FIG 13. Beteckningar Thiems brunnsekvation.

Om brunnsradien, r_w , insättes i ekvationen erhålls höjningen i brunnen under ideala förhållanden. Som framgår beror höjningen i första hand av flöde och transmissivitet medan $\ln R_0/r_w$ i brunnar under drift endast varierar inom ett snävt intervall (se FIG 14). Brunns radien har således obetydlig inverkan på flödet. Förhållandena närmast brunnen påverkar emellertid höjningen. Igensättning av brunns filter eller akviferen närmast brunnen medför att höjningen inne i brunnen blir större än omedelbart före, s k skineffekt (se FIG 15).

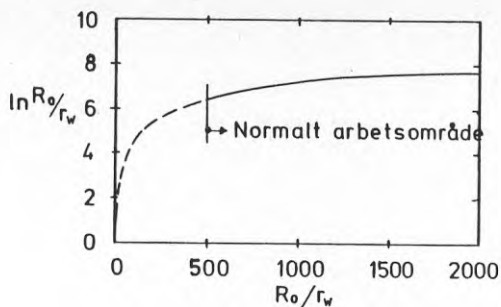


FIG 14. Influensradiens inverkan.

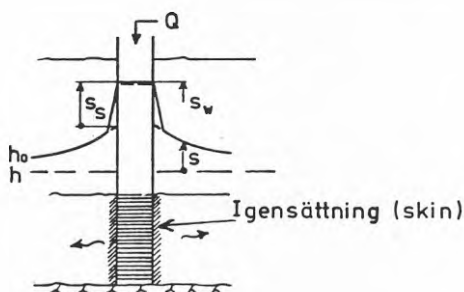


FIG 15. Skineffekt vid infiltration.

Skineffekten kan matematiskt behandlas genom att man inför en skinfaktor, ξ , i brunnsekvationen:

$$s_w = \frac{Q}{2\pi T} (\ln R_0/r_w + \xi), \quad s_w = s + s_s$$

Skinfaktorn ökar med ökad igensättning av brunnen. Enligt ekvationen ökar skinfaktorn linjärt med infiltrationsflödet. Vid höga vattenhastigheter i brunnsens filterdel kan skineffekten antas vara proportionell mot kvadraten på infiltrationsflödet och brunnsekvationen kan tecknas

$$s_w = \frac{Q}{2\pi T} \left(\ln \frac{R_0}{r_w} + \xi \right) + CQ^2$$

där CQ^2 betecknar brunnsens s_k utströmningsförlust.

Om brunnens filterdel ej fullständigt täcker akviferen blir strömningen vid brunnen ej horisontell. Den avvikande flödesbilden medför en ökad vattennivåhöjning i brunnen som kan behandlas på samma sätt som skineffekt.

Vattennivåhöjningen i en ofullständig brunn kan således om igensättningarna är försumbara beräknas som:

$$s_w = \frac{Q}{2\pi T} (\ln R_0/r_w + \xi_p)$$

där ξ_p är pseudoskinfaktor, se FIG 16.

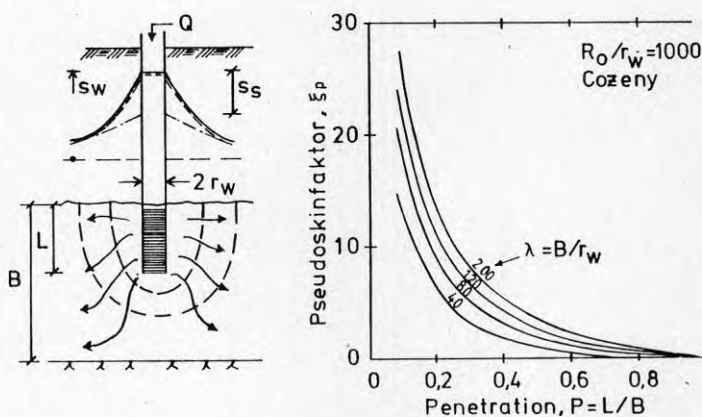


FIG 16. Ofullständig brunn, Pseudoskinfaktor.

En brunnns effektivitet ställs normalt i relation till en fullständig brunn utan igensättningar. Effektiviteten definieras med ett effektivitetstal.

$$\eta = \frac{\ln \frac{R_0}{r_w}}{\ln \frac{R_0}{r_w} + \xi}$$

Det högsta effektivitetstal en verklig brunn kan erhålla är således:

$$\eta_{\max} = \frac{\ln \frac{R_0}{r_w}}{\ln \frac{R_0}{r_w} + \xi_p}$$

På samma vis definieras igensättningsfaktorn:

$$1 - \eta = \frac{\xi}{\ln \frac{R_0}{r_w} + \xi}$$

Av detta framgår att brunnar med hög skinfaktor får en igensättningsfaktor nära 1. Igensättningsfaktorn ger sålunda en direkt upplysning om brunnens kondition.

5.2.2 Dimensionering av brunnar i jord

Infiltrerad vattenmängd och påverkat område vid djupinfiltration bestäms främst av akviferens transmissivitet. För att förutsäga resultatet av en infiltration måste således tillförlitliga hydrauliska parametrar som transmissivitet och magasinskoefficient för akviferen tas fram, t ex genom provpumpning eller provinfiltration.

Förutom av transmissiviteten styrs infiltrationsflödet av brunnens igensättning, som medför att trycket i brunnen blir väsentligt högre än utå i formationen. Igensättningen är i hög grad beroende av infiltrationsvattnets egenskaper och varierar från område till område. Som tumregel kan gälla att en högre igensättningsfaktor än 0.5 inte bör tillåtas före rensning av brunnen om inte skadorna skall bli permanenta.

Dimensionering av infiltrationsbrunn i jord innebär att följande enheter skall bestämmas:

- Filterrörets dimensioner
- Slitstyp och bredd
- Filterttyp
- Rensningsmetod

Dimensionerande vattenmängd för varje enskild brunn bestäms inom snäva gränser av transmissivitet och tillåtet tryck i brunnen. Med en tillåten igensättning av 50% erhålles (se FIG 17) enligt ekvation

$$Q = \frac{h_w - h_0}{2 \ln R_0 / r_w} \cdot 2\pi T \approx 0,45T (h_w - h_0)$$

där $h_w - h_0$ = infiltrationstrycket, dvs skillnaden mellan vattennivån i brunnen under infiltration och i brunnen före infiltration

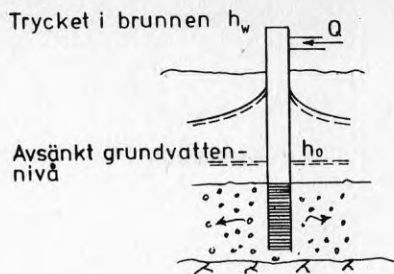


FIG 17. Infiltration under tryck.

Endast i undantagsfall kan stora övertryck tillåtas i en infiltrationsbrunn. I lertäckta områden torde infiltration under måttligt (3-4 mvp) tryck över markytan kunna tillåtas utan att orsaka läckage utmed brunnsröret.

Filtret mot jordlagren kan antingen tillföras vid borrhingsarbetena, grusfilter, eller utvecklas ur formationen genom rensugning. Valet av filtertyp styrs av materialet i akviferen.

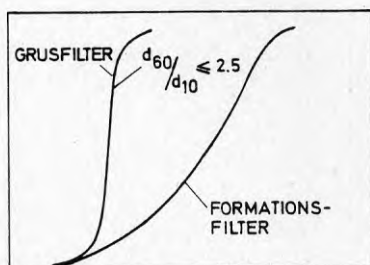


FIG 18. Val av filtertyp.

Om materialet är välsorterat, dvs olikformighetstalet, $d_{60}/d_{10} \leq 2,5$, utförs brunnen med grusfilter, FIG 18.

Grusfiltrets kornstorlek, d_f , väljs med hänsyn till formationens kornstorleksfördelning enligt formeln:

$$d_f = 4,5 \cdot d_k$$

där d_k är lika med skärningen mellan formationens siktkurva och den s k kennkornlinjen (se FIG 19 och bilaga 2).

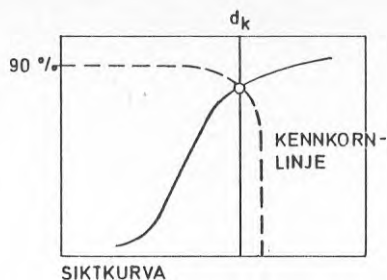
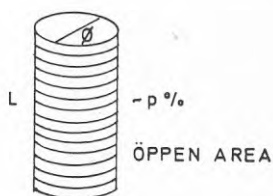


FIG 19. Val av kornstorlek för grusfilter.

Filtrets kornstorlek anpassas till de standardstorlekar som kan erhållas. Grusfiltrets tjocklek väljs till ca 70-100 mm.

Filtorrörets slitsar, dvs hälen väljs så att slitsvidden, t , ej tillåter material från grusfiltret att passera in i brunnen, $t < d_f$. Filtorrörets diameter väljs främst med hänsyn till de installationer som skall finnas i brunnen. Man bör dock eftersträva en invändig diameter av minst 100 mm. Filtorrörets längd anpassas till formationens mäktighet, så att så låg flödes hastighet genom filtret som möjligt erhålles. Hastigheten, v_f , i slitsarna bör under inga förhållanden vara högre än 0,03 m/s för att undvika turbulenta förhållanden, se FIG 20.



$$v_f = \frac{Q \cdot 100}{\pi \phi \cdot L \cdot p}$$

FIG 20. Filtorrörets inflödesarea.

För en brunn med formationsfilter anpassas filtorröret direkt till formationens material. Slitsvidden väljs till $t = d_{60}$ (se FIG 21). Filtorrörets längd anpassas till formationens mäktighet så att inträdeshastigheten i filtret ej överstiger 0,03 m/s.

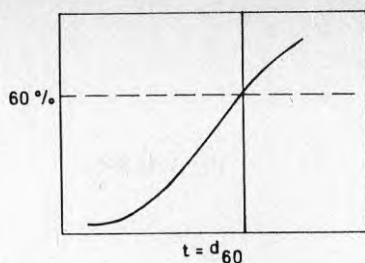


FIG 21. Slitsvidd för en formationsfilterbrunn.

Ett formationsfilter ställer höga krav på brunnens filterrör, då filtret utvecklas genom rensumpning. Filterrör med kontinuerliga och hydrauliskt väl utformade slitsar skall användas. Då kravet på rensumpning alltid är stort för en infiltrationsbrunn rekommenderas att filterrör med kontinuerliga slitsar även används för grusfilterbrunnar.

Kontinuerliga slitsar, i motsats till perforerade slitsar, löper runt hela filterröret som en spiral. Perforerade slitsar består vanligtvis av utstansade hål eller avlånga slitsar.

Vid utförande av såväl grusfilter- som formationsfilterbrunnar är det lämpligt att borrhörerna lämnas kvar som förlängningsrör för att jordlagren skall störas så lite som möjligt och för att förhindra strömning utmed brunnröret. Filterröret bör anslutas till borrhöret ett stycke under täckande finkorniga jordlager (lera) för att dessa ej skall påverkas vid rensumpning, se FIG 22. Avståndet mellan ovanliggande finsediment och filterrörets översta slitsar bör vara minst ca 1,5 gånger brunnrörets diameter. Ansluter borrhöret direkt till filterröret bör nämnda avstånd vara ca 0,5 m om detta är praktiskt möjligt.

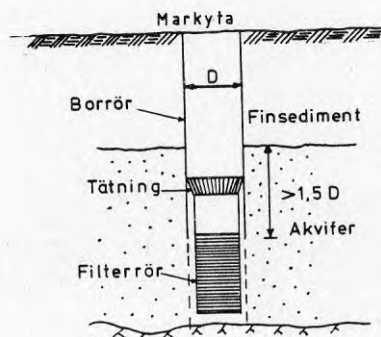


FIG 22. Anslutning av filterrör.

5.2.3 Dimensionering av brunnar i berg.

Sprickigheten i det svenska urberget är vanligen störst i dess övre delar. Speciellt det ytliga berget i kontakt med atmosfären eller med jordlagren uppvisar de mest permeabla delarna i det homogena berget.

Detta sprickiga ytberg utgör i många fall ett kontinuerligt permeabelt lager direkt under lera eller friktionslager. Infiltration i detta lager kan göras genom brunnar från en tunnel, ett bergrum eller från markytan, se FIG 23.

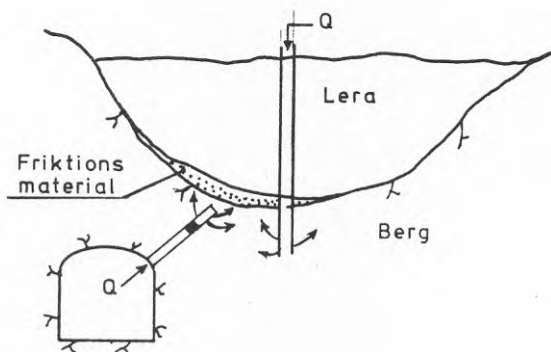


FIG 23. Principen för infiltration i berg.

I de förstnämnda fallen utförs hela infiltrationsbrunnen som ett borrhål i berg medan det senare fallet innebär att brunnen måste drivas genom lösa jordlager och utförs därför vanligen som en rörbrunn med fördjupad del i berg.

Från tunneln eller bergrummet borrar hålen till det sprickiga ytberget utan att borra ut i jordlagren. Hålen riktas så att största möjliga infiltrationsyta är tillgänglig mot bergets överyta. Det innebär att borrhålen riktas nära parallellt med sprickdalens längdaxel. I Sverige är bergborrhål för djupinfiltration i allmänhet utförda med samma maskiner som utnyttjas vid konstruktion av berganläggningen. Håldiametern är 51 mm vilket innebär att vanliga standardinjekteringsmanschetter kan utnyttjas vid infiltrationen.

De borrhål för djupinfiltration som utförts har borrats upp till ca 5 m från förmodad bergyta varefter hålet vattentryckts i tvåmeterssektioner. Om infiltrationskapaciteten varit mindre än ca 5 l/min med några (5-10) mvp:s övertryck har hålet borrats ytterligare två meter varefter provtryckning företagits.

Infiltration av vatten utförs i den del av borrhålet som ligger närmast jordlagren, som medelst en manschett avskärmas från den övriga delen av hålet, se FIG 24. Eftersom infiltration sker från en vanligtvis lågt belägen berganläggning måste ett tryck appliceras på brunnen som överstiger ovanförliggande grundvattentryck. Trycket bör under hela infiltrationen endast vara någon meter vattenpelare högre än grundvattennivån i jordlagren.

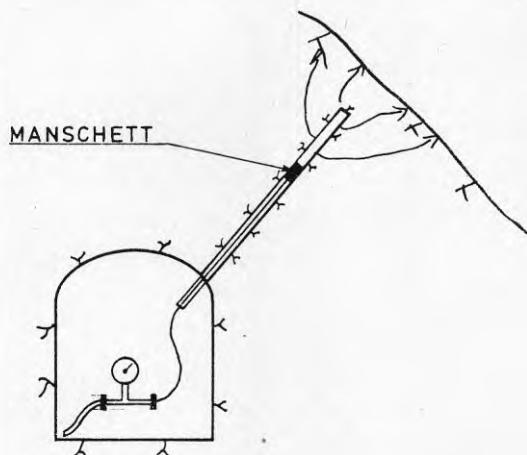


FIG 24. Manschett för infiltration i berg.

5.3 Rensningsmetoder

5.3.1 Varför måste en infiltrationsbrunn rensumpas?

En infiltrationsbrunn måste rensas för att dess kapacitet ej skall minska på grund av igensättning. Brunnen rensas första gången när den är ny, dvs ännu ej tagen i drift. Detta görs för att

- Ta bort den igensättning som orsakats vid brunnsborrningen.
- Öka akviferens permeabilitet närmast brunnen genom att finare material pumpas bort.

Rensningsförfarandet har olika syften vid brunnar med formationsfilter respektive grusfilter. Ett naturligt filter skapas genom att pumpa finare partiklar från formationen in i brunnen och sedan uppfordra dem. På så sätt bildas en zon med hög permeabilitet närmast filterröret (formationsfilter). Vid utnyttjande av grusfilter placeras material med hög permeabilitet närmast filterröret. Finare material i någon större mängd behöver ej pumpas bort för att få goda flödesförhållanden. Den igensättning med fina partiklar som bildats under borrningen måste dock rensas bort. Denna igensättning är belägen utanför grusfiltret och problem kan uppstå att få bort den helt om grusfiltret är för tjockt.

Efter en tids drift måste brunnen rensas igen för att ta bort de igensättningar som uppstår närmast filterröret. Rensningen måste utföras innan den specifika kapaciteten sjunkit med mer än 50% och helst en gång per år. Orsaken till och åtgärder mot igensättning av infiltrationsbrunnar diskuteras ingående i kapitel 6. En av de viktigaste åtgärderna att minska negativa konsekvenser av en igensättning är genom att rensa brunnen med kontinuerligt återkommande intervall.

5.3.2 Vilka rensningsmetoder finns?

Idag utnyttjas i Sverige huvudsakligen två effektiva rensningsmetoder: Manschett-pumpning och jetspolning. Metoderna kan kombineras med kemisk rensning. Ofta används även blåsning med tryckluft som rensningsmetod. Effekten av denna är vanligtvis sämre och mer kortlivad än de ovan nämnda metoderna. Anledningen till detta är bl a

att luft kan tränga in i formationen och sätta igen porerna. För att undvika detta bör man aldrig föra ner tryckluftsslangen i den slitsade delen av brunnen. Effekten blir dessutom liten då endast en inåtriktad strömning mot brunnen erhålles under blåsningen vilket medför att endast det material som är närmast filterröret kommer att rensas bort, dvs ingen djupeffekt erhålles.

Manschett används för att rensa brunnar med perforerade slitsar. Utrustningen består bl a av en renspumpningsmanschett, FIG 25, som delar av ett stycke av filterröret, vanligtvis 0,5 m. Tryckluft är kopplad till manschetten och pumpningen tillgår så att den vilande vattenpelaren i brunnen lyfts upp mot markytan på grund av lufttillskottet, dvs samma princip som en mammutpump. När vattenpelaren når markytan släpps trycket varvid vattnet faller tillbaka ned i brunnen. På detta sätt erhålles en fram- och återgående vattenrörelse genom filterröret och bryggor av finkorniga partiklar bryts ned, se FIG 26.

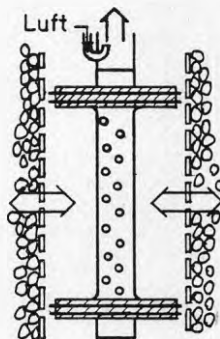


FIG 25. Renspumpningsmanschett.

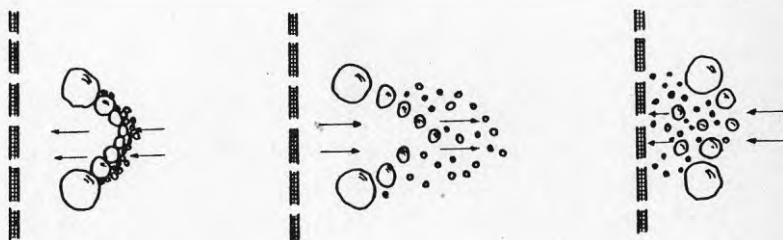


FIG 26. Nedbrytning av bryggor mellan kornen med en fram- och återgående vattenrörelse.

Efter avslutad manschettpumpning då ett klart rent vatten erhålles kan grusfilter och formation ha det utseende som åskådliggjorts i FIG 27.

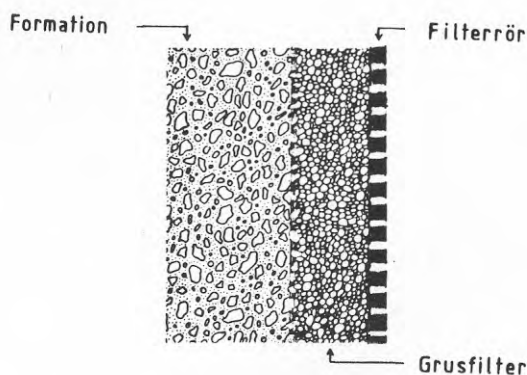


FIG 27. Grusfilter

Manschettpumpningen med tryckluft fordrar, för att vara effektiv, ett visst mottryck vid luftinsläppet. Den vilande vattenpelaren ovanför manschetten bör därför vara minst två gånger större än avståndet från vilande vattenyta till utloppet enligt FIG 28. Metoden innebär att brunnen rensas ren från sand och vatten mellan varje rensningssteg. Manschett-pumpningsutrustningen måste därför vara så konstruerad att vattenförseel från markytan är möjlig för att snabbt erhålla erforderlig vattenpelare före varje rensning.

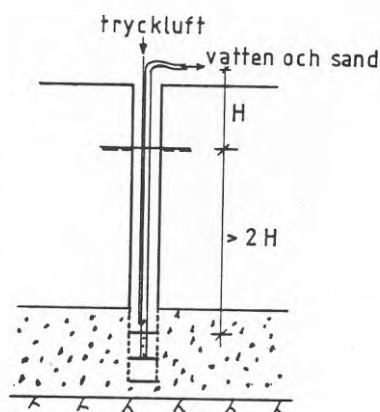


FIG 28. Manschettpumpning

Vid jetspolning spoljas filterröret inifrån med vatten under högt tryck. Vattnet tillförs spolmunstycken, som roterar inuti brunnen för att hela filterröret skall rensas, enligt FIG 29. Spoltrycket bör vara så högt att en vattenhastighet på ca 40-65 m/sek erhålles ur munstyckena, enligt tabell 5.1. Låg hastighet bör hållas om rensningen utförs i närheten av exempelvis ett lerlager. Samtidigt med spolningen bör en vattenmängd som är ca 50% större än spolmängden pumpas ur brunnen.

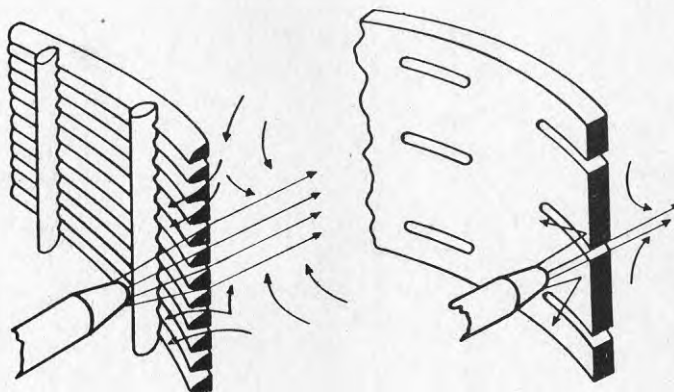


FIG 29. Jetspolning

Tabell 5.1. Spoltryck och vattenmängder vid jetspolning

Spoltryck p (bar)	7,5		10		15		20	
Munstycke Ø (mm)	v (m/s)	Q (l/s)	v (m/s)	Q (l/s)	v (m/s)	Q (l/s)	v (m/s)	Q (l/s)
5	40	0,8	45	0,9	55	1,1	65	1,2
6	40	1,1	45	1,3	55	1,5	65	1,8
9	40	2,5	45	2,9	55	3,4	65	4,0
12,5	40	4,8	45	5,5	55	6,6	65	7,7

Jetspolning utnyttjas framför allt vid filterrör med kontinuerliga hydrauliskt väl utformade slitsar. Här är metoden effektiv och kan användas både vid grus- och formationsfilterbrunnar.

Efter rensning med hjälp av jetspolning kan ett formationsfilter ha det utseende som framgår av FIG 30.

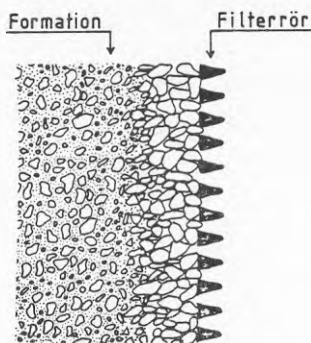


FIG-30. Formationsfilter

Kemisk rensning av brunnar används för att lösa upp eller lösgöra produkter som fastnat i brunnen eller i akviferen och som reducerar permeabiliteten närmast brunnen. En kemisk behandling utförs i kombination med mekanisk rensning. Olika metoder som vanligtvis används är

- syrabehandling
- behandling med ytspänningsnedsättande kemikalier
- klorering

Syrabehandling används för att lösa upp igensättande produkter såsom järn, mangan och kalciumföreningar. Olika syror används beroende på vad som skall lösas upp. Längre har saltsyra, HCl, varit den vanligaste. Många tveksamma resultat, främst i lerhaltiga jordar har medfört att även andra syror kommit till användning. Oavsett vilken syra som används kan leraggregat lösas upp och svälla vilket medför att det är mycket viktigt att en brunn efter kemisk rensning också rensas mekaniskt för att få bort allt upplöst material från akviferen. De vanligaste syrorna som används är:

- Oxalsyra (effektiv på järn- och manganföreningar)
- Saltsyra (mest effektiv på kalciumföreningar)
- Sulfaminsyra

För att förhindra angrepp på brunnsröret har i vissa fall ättiksyra använts i stället för saltsyra, vilket ansetts som lika effektivt ur rensningssynpunkt. Ättiksyra kan dock utgöra näring för anaeroba bakterier, varför den bör undvikas. Oxalsyra är lätt att använda då den inte angriper installationer och rör i brunnen.

En kemisk rensning bör utföras enligt följande schema:

- a) Känsliga installationer tas upp ur brunnen om saltsyra används. Syra tillsätts med slang direkt till filterröret. Syran skall ha en koncentration på 10 vikt-% och doseras till en volym som fyller brunnen hela filterdel samt 2 m ut i formationen, FIG 31.

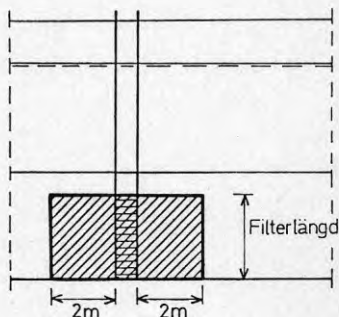


FIG 31. Den volym som skall fyllas med rensningskemikalie vid kemisk rensning.

Om man även önskar en rensningseffekt på förlängningsröret kan en större mängd kemikalier tillsättas.

För att få ut kemikalien i formationen fylls vatten på uppifrån motsvarande den kemikalievolymsom skall ut i formationen. För att beräkna denna volym utnyttjas akviferens porositet, n .

- b) Tillsatt syra får verka under en tid av minst 12 timmar. Brunnen pumpas därefter till dess att uppfordrat vatten har ett så högt pH att mekanisk bearbetning är lämplig ($\text{pH} = 4$). Det uppumpade vattnet neutraliseras med kalk, innan det leds vidare från brunnsplatsen.
- c) Brunnen rensas med någon mekanisk metod och pumpas tills vattnets pH åter är normalt. Efter avslutad rensning kontrolleras brunns infiltrationskapacitet.

I samband med kemisk rensning kan ytspänningsnedsättande kemikalie, vanligen natriumhexametafosfat, tillsättas. Denna minskar det igensättande materialets förmåga att attraheras till brunnsväggar och filter men verkar dispergerande på lera.

Igensättning orsakad av mikrobiell aktivitet kan motverkas genom klorering i någon form. Klor verkar genom att dels avbryta mikrobiell verksamhet dels, genom att lösa upp eller lösgöra den igensättning som bildats härav i formationen. Efter klorering skall brunnen rensas mekaniskt. Vanligtvis utnyttjas natriumhypoklorit som rensningskemikalie.

5.4 Praktiska synpunkter

En djupinfiltrationsanläggning som skall kunna fungera under en längre tid måste planeras med hänsyn till följande

- Tillförsel av infiltrationsvatten
- Avlopp från anläggningen
- Elförsörjning
- Åtkomlighet
- Hänsyn till omgivning (trafik, kringboende)
- Skydd mot åverkan

Den vattenmängd som erfordras för en djupinfiltrationsanläggning är relativt ringa, vanligen mindre än 20 l/min. Försörjning kan ske från kommunalt vattenledningsnät eller från läckagevatten i den dränerande anläggningen som orsakar behovet av djupinfiltration.

Kommunalt vatten kan inom bebyggda områden vanligen fås temporärt från brandposter. Kommunens vattenverk tillhandahåller ständror med mätare som med jämna mellanrum avläses för debitering. Vatten kan även tas provisoriskt från en fastighet genom överenskommelse med fastighetsägaren. För att särskilja förbrukningen bör särskild vattenmätare inkopplas. I de fall där djupinfiltration kan förväntas pågå under flera år bör en permanent inkoppling till vattenledningsnätet övervägas.

Kostnaden för kommunalt vatten visar en ökande tendens. För infiltrationsändamål bör det varit möjligt att uppnå specialpris genom att kostnaden för avloppsdelen bortfaller, vilken vanligtvis uppgår till ca 50% av avgiften.

Djupinfiltration med vatten från den dränerande anläggningen har många fördelar. Vattenanslutning kan dock medföra en del problem, om djup-

infiltrationsanläggningen inte ligger i eller i anslutning till den dränerande anläggningen (tunnel eller bergrum).

Det är viktigt att såväl djupinfiltrationsanläggningen som vattenledning till anläggningen skyddas mot kyla så att inte avbrott på grund av isbildning inträffar. Också av flera andra skäl kan det vara lämpligt att förlägga installationer till infiltrationsbrunnen under mark. Hänsyn måste härvid tas till vatten som kan läcka in och som spolats upp ur brunnen vid rensning varför anslutning till avloppsnätet bör finnas i anläggningens närhet.

Djupinfiltrationsanläggningar kräver elanslutning för eventuella pumpar, belysning och i vissa fall även för övervakning. Kommunala energiverk eller motsvarande lämnar uppgifter om hur sådan anslutning lämpligast sker. För larmanordningar som varslar vid driftstörningar, kan televerket ge upplysningar om vilka möjligheter som finns att tillgå via telenätet.

Installation, drift och underhåll av djupinfiltrationsanläggning kräver i regel åtkomlighet för större fordon (grävsropa, kompressor, borrh- och spolaggregat m m). Detta måste beaktas särskilt vid placering av permanent anläggning. I möjligaste mån bör en djupinfiltrationsanläggning placeras så att trafik inte störs och att markförlagda ledningar och liknande inte skadas. Kontakt skall alltid tas med berörda myndigheter (polis, gatukontor, VA-verk, elverk, televerk) inom bebyggda områden.

Ett vanligt problem är åverkan på anläggningarna. Det är också av denna anledning lämpligt att placera anläggningen nedgrävd i mark, i intilliggande fastighet eller i speciell bod.

5.5 Exempel på djupinfiltrationsanläggningar

I det följande redovisas två exempel på djupinfiltrationsanläggningar. Exempelen vill endast belysa de installationer som kan förekomma i samband med djupinfiltration. I det övre exemplet FIG 32 utnyttjas kommunalt dricksvatten för infiltration i jord. Infiltrationsvattnet fås från vattenledning inte långt från infiltrationsplatsen. Vattenledningstrycket utnyttjas som infiltrationsstryck. Alla installationer är inrymda i en brunnskammare under marknivå. För behandling av vattnet

har i figuren markerats en filterpatron. Detta för att belysa placeringen av en sådan, se vidare kapitel 6.2.2.

I det undre exemplet FIG 32 återges en infiltrationsanläggning i berg där läckagevatten utnyttjas som infiltrationsvatten. I detta exempel har ej filterpatron för vattenbehandlingen tagits med.

Anläggningen är placerad i en vänd-nisch i en tunnel. Infiltration sker i två borrhål. För uppsamling av läckagevatten i tunneln finns pumpgröpar i lågpunkterna. Från en sådan lågpunkt pumpas vattnet till infiltrationsplatsen.

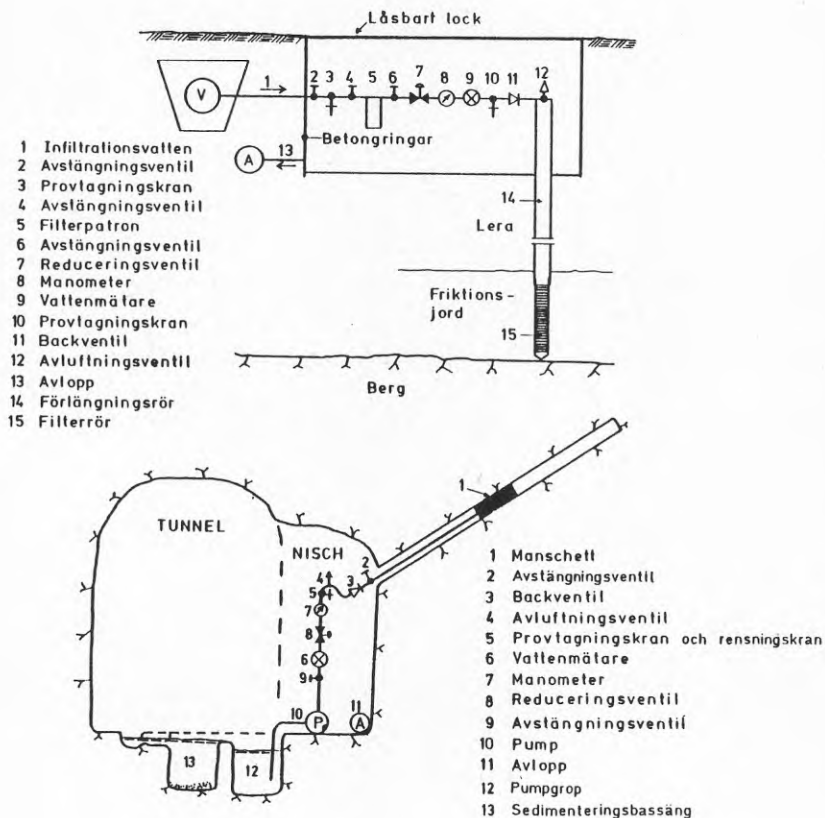


FIG 32. Exempel på infiltrationsanläggningar.

6. IGENSÄTTNING AV INFILTRATIONSBRUNNAR

6.1 Vad menas med igensättning?

Med igensättning avses en minskning av genomströmningsarean i och omkring ett brunnsfilter. Minskningen innebär att permeabiliteten sjunkit och därmed även brunnens kapacitet vid konstant vattentryck över brunnen.

Igensättning kan beskrivas kvantitativt med hjälp av effektivitetstalet, η , vilket bestäms genom kapacitetstest enligt avsnitt 7.3.

6.2 Vad beror igensättning på och hur förutsägs och undviks den?

6.2.1 Igensättande faktor

Igensättning sker i brunnsfiltret och i omgivande akvifer i direkt kontakt med brunnen. I bergborrade hål där brunnsrör saknas sker igensättningen direkt på borrhålets väggar och i sprickor i kontakt med borrhålet.

Igensättning beror av följande faktorer:

- suspenderat material i infiltrationsvattnet
- luft och gas i infiltrationsvattnet
- kemiska reaktioner mellan grundvattnet och infiltrationsvattnet med voluminösa utfällningar som slutprodukter
- urlakning och dispergering av lerfraktionen i akviferen
- mikrobiell aktivitet
- strukturförändringar av akviferen på grund av för höga vattenhastigheter hos infiltrationsvattnet.

I de följande avsnitten diskuteras de nämnda faktorerna var för sig. Varje avsnitt är disponerat enligt följande:

- (A) Hur sker igensättning?
- (B) Hur förutsägs igensättning?
- (C) Hur åtgärdas eller undviks igensättning?

6.2.2 Suspenderat material

(A) Hur sker igensättning?

Suspenderat material i infiltrationsvatten orsakar redan i små mängder igensättning. Igensättningen utbildas genom att partiklarna i vattnet filtreras ut i brunnens närhet och bildar en filterkaka. På grund av partiklarnas ringa storlek blir vattengenomsläppligheten hos filterkakan mycket liten, dvs formationens effektiva permeabilitet sjunker. Även om dricksvatten utnyttjas för infiltrationsändamål är denna faktor av stor betydelse.

(B) Hur förutsägs igensättning?

Vatten är aldrig helt fritt från suspenderat material. En igensättning kan således alltid påräknas vid infiltration.

Bestämning av ett infiltrationsvattens kvalitet vad avser suspenderat material varierar. En metod är bestämning av kvalitetstalet w/k_C utgående från halt av suspenderat material (w) i vattnet och permeabiliteten (k_C) på det suspenderade materialet. Ett bra vatten har ett lägre kvalitetstal än ett dåligt vatten. Beskrivning av analysförfarande och bestämning av kvalitetstalet framgår av bilaga 3. Ett enklare sätt att bestämma vattnets igensättande egenskaper kan vara att enbart studera filtreringskurvans utseende vid filtrering av infiltrationsvatten genom ett membranfilter. Förfarandet framgår av bilaga 3.

Kvalitetstalet eller filtreringskurvan ger inte något absolut värde på förväntad igensättning utan används i stället för att jämföra olika vatten. Formler för bestämning av igensättningens storlek finns, men dessa ger något osäkra värden och värdet av dem kan därför ifrågasättas för detta ändamål (se Andersson och Berntson, 1978).

(C) Hur åtgärdas eller undviks igensättning?

Igensättning kan åtgärdas eller reduceras genom att antingen rensa brunnen eller behandla infiltrationsvattnet genom filtrering. I marknaden finns i princip två olika utföranden av filter lämpliga i samband med djupinfiltration, filterpatroner och sandfilter. Båda typerna förekommer med olika por- eller kornstorlekar. Vilken storlek som skall väljas bestäms av de suspenderade partiklarnas storlek och fördelning.

Som vägledning kan nämnas att vid infiltration till en moränavlagring i Göteborg (permeabiliteten ca 10^{-6} m/s) utnyttjades bomullsvirade filterpatroner med porstorlek 5-10 μm . Infiltrationsvattnet är ett kommunalt försörjningsvatten. Vid infiltration med ca 3 l/min får filterpatronerna bytas ca 1 gång per månad.

Vid infiltration av små vattenmängder till lågpermeabla formationer bör filter ingå i standardutrustningen till brunnen. Noggrannare analyser av infiltrationsvattnets halt av suspenderat material kan då undvikas helt eller vänta så länge inget oförutsett inträffar.

6.2.3 Luft och andra gaser

(A) Hur sker igensättning?

Gas kan tillföras infiltrationsvattnet före eller i samband med infiltration. Det vatten som utnyttjas för infiltrationsändamål har vanligen genomgått någon form av behandling varvid vattnet varit i kontakt med luft. Vattnet kan också tillföras luft i samband med den direkta vattentillförseln till infiltrationsbrunnen om denna utförs under öppna förhållanden. Mikrobiell verksamhet i brunnen eller i akviferen kan också medföra tillförsel av gas till infiltrations- eller grundvattnet.

Om ett poröst medium som t ex sand genomströmmas av en vätska som innehåller gas överstigande mättnadsvärdet kommer gasbubblor att avsättas i sandens porer. Bubblorna fastnar i porutrymmet och minskar den tillgängliga genomströmningsarean. Permeabiliteten kommer då att sjunka till en jämviktsporneabilitet på grund av att gas ackumuleras i porsystemet. Vid denna permeabilitet avges samma mängd gaser från porerna som tillförs med vattnet. Jämviktsporneabiliteten är vanligtvis ca 60-70% av ursprungsporneabiliteten.

Gas kan bildas i filterspetsens närhet som produkter av mikrobiella processer, dvs nedbrytning av organiskt material. Bakterierna kan antingen direkt avge gas eller orsaka en förhöjd temperatur varvid gas utlöses. Gas bildad av mikrobiell verksamhet är i normala fall av begränsad betydelse.

Om vattnet får falla fritt ned i brunnen kan luft från atmosfären dras med vattnet varför det blir övermättat av gaser vid infiltrationsnivån.

Vid konstruktion och rensning av infiltrationsbrunn utnyttjas vanligen tryckluft tillsammans med vatten för att spola upp material. Luft kan då tränga in i akviferen som vid infiltrationens start transporteras vidare in i akviferen och orsakar permeabilitetsnedsättning.

ⓑ Hur förutsägs igensättning?

För att förutsäga en igensättning på grund av luft i infiltrationsvattnet kan detta analyseras med avseende på syre. En viss mängd syre motsvarar en viss mängd luft enligt bilaga 4. Innehåller vattnet mer luft än vad som kan lösas vid rådande temperatur och tryck i akviferen kommer en igensättning att ske. Lufts löslighet vid olika temperaturer och tryck framgår av bilaga 4.

ⓒ Hur åtgärdas eller undviks igensättning?

Infiltrationsvattnet får ej vara övermättat på luft. Ett övermättat vatten måste avluftas under så lågt tryck som möjligt, exempelvis via en automatisk avluftningsventil efter tryckreducering. I de fall infiltration sker under lågt tryck kan det vara nödvändigt att avlufta ett övermättat vatten med vacuumpump.

Djupinfiltration får ej ske på sådant sätt att luft från atmosfären kan dras med vattnet ned i brunnen. Problemet undviks genom att tillföra brunnen vatten via ett infiltrationsrör som mynnar under vattenytan i brunnen eller genom att infiltrera i ett helt slutet vattenfyllt system. Givetvis måste ledningssystem före driftsstart avluftas.

Vid anläggning och rensning av infiltrationsbrunn är det viktigt att avsluta arbetena med att pumpa brunnen varvid eventuella luftbubblor i akviferen pumpas bort.

6.2.4 Kemiska reaktioner

Grundvatten innehåller alltid lösta salter. En del följer med den nederbörd som bildar grundvattnet, huvuddelen löses ut från markvattenzonen och en del löses ur den jord eller berggrund som bildar grundvattenmagasinet.

Grundvatten står vanligtvis i kemisk jämvikt med det material som det strömmar genom. Om ett främmande vatten tillförs en grundvattenförande formation kommer grundvattnet och jorden att sträva efter en ny jämvikt med det nytillförda vattnet.

Svenska grundvatten har i allmänhet hög halt av järn (Fe), mangan (Mn) och vätekarbonat (HCO_3) i vissa fall även kalcium (Ca). De reaktioner som kan ske i samband med infiltration berör främst dessa ämnen, dvs järns löslighet och kalk-kolsyra-jämvikten. I tabell 6.1 visas generellt olikheterna mellan ytvatten och grundvatten i Sverige.

Tabell 6.1 Några karakteristiska kemisk-fysikaliska parametrar hos yt- och grundvatten.

	<u>Ytvatten</u>	<u>Grundvatten</u>
Temperatur	varierande, 0-20 ^o	jämn, ca 10 ^o
Färg mätt som mg/l Pt	vanligen hög, 10-100	låg, 0-10
Grumlighet	tydlig	ingen
Org ämnen, som mg/l KMnO_4	vanligen hög, 10-100	låg, 0-10
Hårdhet	låg, 0-1 dH ^o	hög, 5-25 dH ^o
	0-3.5 mg Ca/l	35-180 mg Ca/l
Fe, Mn	vanligen endast spår	ibland hög
Klorid, nitrat, sulfat	låga	vanligen låga
Bikarbonat, mg/l	låg, 0-70	hög, 0-500
Kolsyra, mg/l	låg, 0-10	hög, 10-100
Syre, mg/l	vanligen hög, 5-15	0 eller låg
Bakteriell förorening	påtaglig eller stor	vanligen ingen eller låg

Produkten av en kemisk reaktion resulterar vanligen i brunnssammanhang i en inkrustation. Inkrustation, även benämnd cementation, definieras såsom en "utfällning av bindmaterial" runt korn och medför en minskning av porutrymmet och därmed även vattengenomsläppligheten. Inkrustation förorsakad av kalciumkarbonat sker snabbt efter utfällning. I samband med infiltration i en brunn vars omgivning är reducerad kommer, såvida infiltrationsvattnet ej också är reducerande, en zon att bildas invid silröret med en redoxpotential E_h på ca +20 mV om pH = 7, med utfällning av i första hand järnhydroxid som resultat. Detta förorsakar tillsammans med de järnbakterier som medverkat vid oxideringen av järn så småningom inkrustation. Om kravet på låg hastighet i slitsarna beaktas

vid dimensioneringen av brunnen kan inkrustationen minimeras. Problemet kan även uppstå på grund av mangan, dock vid ett betydligt högre E_h -värde ($E_h > 600$ mV vid pH 7).

Järn:

(A) Hur sker igensättning?

Järn kan förekomma i vatten i löst (Fe^{2+} , ferro) eller utfälld (Fe^{3+} , ferri) form beroende på vattnets redoxpotential (E_h) samt pH som visas i FIG 33.

I slutna akviferer råder i många fall reducerande förhållanden (låg redoxpotential). Tillförsel av infiltrationsvatten som vanligen har hög redoxpotential medför utfällning av i första hand järnhydroxid. Tillammans med de järnbakterier som medverkar vid oxideringen av järn fås så småningom en inkrustation i brunns filter eller i akviferen.

(B) Hur förutsägs igensättning?

Genom analys av infiltrations- och grundvattnets pH, redoxpotential och järnhalt kan, med utnyttjande av diagrammet i FIG 33, risken för järnutfällning bedömas. Ett syrerikt infiltrationsvatten kan antas representeras av punkt A i figuren och ett grundvatten som håller en hög halt löst järn med lågt E_h kan antas representeras av punkt B i figuren. Det luftade infiltrationsvattnet kommer således i kontakt med det järnhaltiga reducerande grundvattnet att orsaka utfällning av $Fe(OH)_3$.

Vid vattenprovtagning kan luftens syre påverka jämvikterna i vattenprovet, vilket medför ej representativa redoxpotentialmätvärden. Luftens syre medför exempelvis att jämvikten i ett vattenprov förskjuts mot en allt högre halt ferrijärn, Fe^{3+} och en allt mindre halt av ferrojärn, Fe^{2+} och därmed erhålls ett allt högre redoxpotentialvärde med tiden för samma vattenprov. Redoxpotentialmätningar skall därför utföras in situ.

Förutsättning för att järn skall delta i de nämnda redoxprocesserna är att det inte är bundet som komplex eller som kolloid med humus. I sådana vatten kan tvåvärt järn förekomma i stora mängder trots närvaro av syre och oxideringen av tvåvärt järn till trevärt sker mycket långsamt.

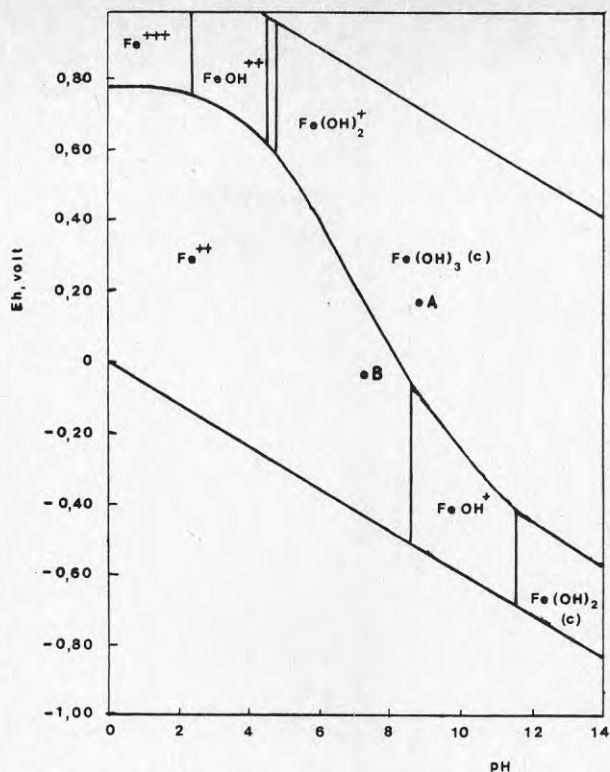


FIG 33. Stabilitetsdiagram för järn.

Utfällningen sker i kontaktzonen mellan infiltrations- och grundvatt-
net. Denna zon ligger vid infiltrationsstart intill brunnen men flyt-
tas under infiltrationens gång allt längre från brunnen. Detta innebär
att utfällningen sker inom en stor porvolym och igensättningen torde
vara försumbar vid små infiltrationsflöden.

Ⓒ Hur åtgärdas eller undviks igensättning?

Utfällning av järn kan ej helt förhindras. Genom att sänka infiltrationsvattnets pH kommer utfällning att ske långsammare och i en mindre omfattning. Eventuellt kan utfällningar rensas bort. Detta skall utföras vid tillfälle då det naturliga grundvattnet ej kan nå brunnen igen vid rensningen, eftersom det reducerade grundvattnet i så fall kan lösa upp redan utfällt järn i brunnens närhet. Om detta upplösta järn ej pumpas upp under rensningen kommer det att fällas ut då infiltration startar på nytt. Genom upprepade rensningar kan en zon med utfällt järn accumuleras i brunnens närhet och orsaka en kraftig igensättning som med tiden blir svår att rensa bort.

Kalcium:

Ⓐ Hur sker igensättning?

Atmosfären innehåller koldioxid (CO_2) i begränsad mängd (0,03%). Den nederbörd som passerar genom marken och bildar grundvatten har dock en högre halt av löst koldioxid (kolsyra) än vad som motsvaras av atmosfärens sammansättning. Detta beror på de nedbrytande mikrobiella processerna i marken där koldioxid i stor mängd förekommer. Vanligtvis har grundvatten hög koncentration av kolsyra och kalcium. Ett grundvatten med hög halt av kolsyra och kalcium kan i kontakt med atmosfären fälla ut kalciumkarbonat (CaCO_3) på grund av att koldioxid avges vid det lägre partialtrycket. Problem med kalkutfällningar är störst i samband med uttagsbrunnar och bör vara litet vid infiltrationsbrunnar.

Ⓑ Hur förutsägs igensättning?

Genom att analysera infiltrations- och grundvattnet med avseende på kalcium, vätekarbonat, pH och temperatur kan vattnens aggressiva respektive kalkutfällande egenskaper beräknas utgående från gällande jämviktsekvationer. Beräkningen utförs vanligtvis av vattenlaboratorier.

Ⓒ Hur åtgärdas eller undviks igensättning?

Om en utfällning av CaCO_3 befaras bör infiltrationsvattnets pH justeras så att jämvikts-pH underskrids. Alternativt kan brunnen rensas på kemisk väg.

6.2.5 Dispergering av lera

(A) Hur sker igensättning?

Lerpartiklar, dvs partiklar mindre än $2 \mu\text{m}$, bildar, när de är starkt bundna till varandra, aggregat som ej transporteras med normala vattenflöden i en formation. Om de krafter som håller partiklarna samman försvagas kan aggregaten så småningom slås sönder varvid enskilda lerpartiklar kan transporteras med grundvattenflödet. I trånga passager kan dessa partiklar fastna varvid risk för igensättning föreligger. De jordlager som infiltration utförs i innehåller upp till någon procent ler. Denna mängd är tillräcklig för att ge en kännbar igensättning på grund av dispergering.

Lerpartiklar utgörs dels av nedkrossat bergmaterial och dels av sk lermineral, t ex illit och montmorillonit. Lerpartiklar är så gott som alltid negativt laddade. Den negativa laddningen balanseras av att positiva joner, katjoner, binds till partikeln p g a elektrostatisk attraktion. Partikelns negativa laddning och katjonerna bildar då ett sk elektriskt dubbellager, FIG 34. Den höga koncentrationen av katjoner vid partikelytan medför att joner vill diffundera ut i vattenlösningen för att nå jämvikt varför katjon-skiktet kommer att bli diffust, dvs katjonerna sprids inom ett relativt stort område runt lerpartiklen. Ju större jonstyrka vätskan runt leran har desto kompaktare blir det diffusa skiktet och partiklarna binds närmare varandra till aggregat.



FIG 34. Elektriskt dubbellager.

Laboratorieexperiment har visat att ökad valens hos katjonerna minskar dubbellagrets volym och binder därmed partiklarna närmare varandra.

Lerors flockningsegenskaper påverkas av vätskefasens koncentration av katjoner vilket kan uttryckas enligt det sk natriumadsorptions-talet, SAR enligt FIG 35.

$$\text{SAR} = \sqrt{\frac{\text{Na}^+}{\frac{\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}}{2}}}$$

Koncentrationer i m eqv/l

En leras aktivitet i samband med jonbytesreaktioner beror på dess struktur och mineralinnehåll och anges genom lerans jonbyteskapacitet. Permeabilitetsförändringar hos en jordart som innehåller lera beror således på faktorer som

- lerhalt i jordarten
- typ av lera, dvs jonbyteskapacitet
- infiltrationsvattnets jonstyrka eller SAR

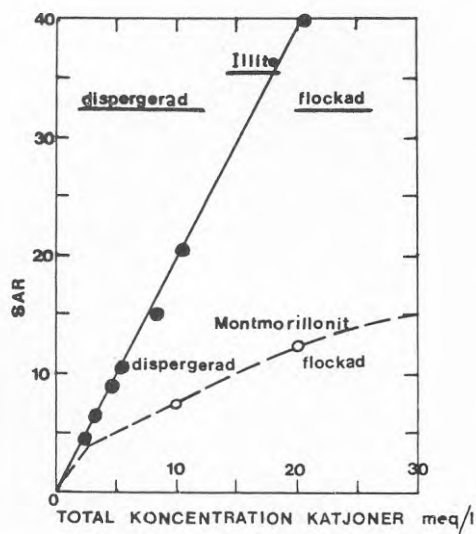


FIG 35. Illit och montmorillonits flockningsegenskaper relativt SAR. I Sverige är illit vanligare lermaterial än montmorillonit.

Lerors hållfasthet i relation till SAR bör även påpekas i detta sammanhang. Ett vatten med låg jonstyrka och högt SAR-värde kan orsaka en nedsättning av lerans hållfasthet. Beroende på vattnets SAR och pH förändras materialets hållfasthet olika snabbt vid olika skjuvhållfasthet hos leran (Arulanandan et al 1975). Resultatet av en nedsättning av hållfastheten hos det överlagrande lerlagret kan bli sättningar eller minskad stabilitet hos området.

ⓑ Hur förutsägs igensättning?

Sambandet mellan faktorerna lerhalt, lertyp, SAR och igensättning finns ej sammanställt. Risk för permeabilitetsnedsättning får därför bedömas utgående från beräkningar av SAR på infiltrationsvattnen och bedömningar enligt FIG 35.

Som riktvärde kan också anges att om det ursprungliga grundvattnet har hög halt av natriumklorid så är risken för dispergering vid infiltration av sött vatten större än om grundvattnet är saltfattigt. Exakta värden för hur permeabiliteten förändras vid dispergering av lera i en akvifer saknas. Exempel finns på mycket stora permeabilitetsnedsättningar vid utländska infiltrationsprojekt.

ⓒ Hur åtgärdas eller undviks igensättning?

Infiltrationsvattnen med värden på SAR så att det faller över kurvan för illit i FIG 35 bör behandlas genom tillsats av exempelvis CaCl_2 så att acceptabel nivå enligt figuren erhålls.

Igensättning orsakad av lerpartiklar kan vara svår att rensa bort speciellt om denna ägt rum långt in i akviferen.

6.2.6 Mikrobiell aktivitet

Ⓐ Hur sker igensättning?

I en markprofil avtar mängden mikroorganismer kraftigt med djupet. Vid de djup som är aktuella för djupinfiltration har mängden organismer avtagit betydligt och de som trots allt finns kvar är relativt inaktiva på grund av den vanligtvis låga temperaturen och näringstillgången. Problem som kan uppstå med igensättning på grund av mikroorganismer beror därför inte huvudsakligen på mikroorganismer i formationen utan på tillväxt av de organismer som tillförs med infiltrationsvattnet med däri ingående näringsämnen.

Undersökningar av kommunala dricksvatten vad avser mikroorganismer in-skränker sig vanligtvis till bakterier av fekalt ursprung som t ex *Excherichia coli* (E-coli) som inte är önskvärda i ett dricksvatten. Från infiltrationssynpunkt spelar de ingen roll så länge det infiltrerade vattnet ej skall återvinnas för försörjningsändamål.

Mikroorganismer som medför igensättning av en brunn gör det dels genom sin form, de är ofta trådiga, voluminösa och slemmiga, dels genom att de producerar produkter som sätter igen, t ex flockar eller gaser.

Slembildande bakterier som förekommer i ledningsnät är de s k järn-manganbakterierna som oxiderar tvåvärt järn och mangan till hydroxid. De vanligaste arterna tillhör ordningen *Pseudomonadales*, släkten *Gallionella* samt ordningen *Chlamydoobacterales*, släkten *Leptothrix*, *Sphaerotilus* och *Chrenothrix*. De olika arterna återfinns i olika miljöer. *Gallionella* är vanligast i vatten med litet innehåll av organiskt material medan *Leptothrix* och *Crenothrix* vill ha större tillgång på organiskt material vilket illustreras av FIG 36.

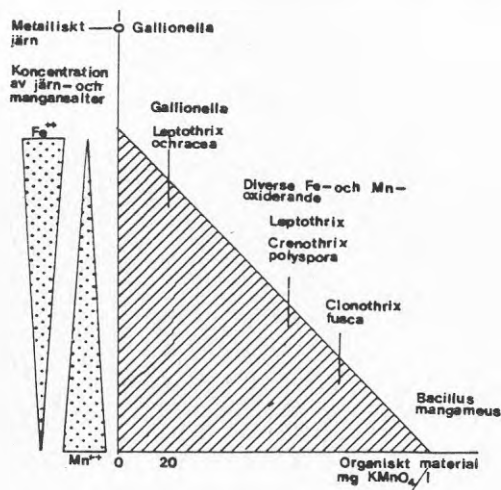


FIG 36. Järn-manganbakteriers behov av organiskt material (Ormerod, 1974).

De ovannämnda bakterierna är de vanligaste slembildande bakterierna som förekommer i vattentransporterande ledningsnät. Naturligtvis kan även andra typer förekomma men får sökas från fall till fall. Många av organismerna är svåra att odla och påvisa och det är lättast att nå resultat vid en analys om man söker dem där de växer, dvs i ledningar och brunnrör i stället för i vattnet.

Av underordnad betydelse i det här sammanhanget torde den sulfatreducerande bakterien vara. Denna bakterie producerar vätesulfid från sulfat i närvaro av organiskt material i anaerob miljö.

Ⓑ Hur förutsägs igensättning?

Bakterier förekommer alltid i ledningsnät. Genom information om driftsproblem vid vattenverk eller på ledningsnät kan i bästa fall det eventuella problemets omfattning uppskattas. Förekommer mycket mikroorganismer i infiltrationsvattnet bör man räkna med att en igensättning kan erhållas. Om infiltrationsvattnet håller ett kloröverskott bör dock risken för igensättning var liten.

Ⓒ Hur åtgärdas eller undviks igensättning?

Mikrobiell verksamhet förhindras genom att ett kloröverskott alltid hålls i infiltrationsvattnet.

Har mikroorganismer i infiltrationsbrunn och dess omgivning fastställts bör brunnen chockkloreras vid rensning (ca 50-100 mg klor/l).

6.3 Sammanfattning

Bedömning av risk för igensättning enligt avsnitt 6.2 fordrar god kännedom om grundvattnets, infiltrationsvattnets och akviferens sammanfattning och egenskaper.

Provtagning av vatten, såväl grundvatten som infiltrationsvatten skall utföras på infiltrationsplatsen eller dess närhet. Under transport på ledningsnätet kan försörjningsvattnets egenskaper förändras och analyser på vattenprov tagna vid vattenverk behöver ej vara representativa för vattenbeskaffenheten vid infiltrationsplatsen.

Följande parametrar vad avser infiltrationsvattnets beskaffenhet bör analyseras:

temperatur

pH

redoxpotential

ledningsförmåga

KMnO₄-förbrukning

suspenderat material (endast infiltrationsvatten)

järn Fe

mangan Mn

natrium Na

magnesium Mg

kalium K

kalcium Ca

vätekarbonat HCO₃

klorid Cl

sulfat SO₄

syre O₂

kloröverskott

restprodukter från behandling i vattenverk, t ex AlSO₄, FeCl₂, SiO₂ etc

mikroorganismer

De flesta av ovanstående kemiskt-fysikaliska analyser på vatten utföres enligt standardmetoder för undersökning av dricksvatten.

Större noggrannhet krävs dock vad avser analys av suspenderat material, se bilaga 3.

7 DRIFT OCH KONTROLL AV DJUPINFILTRATIONSANLÄGGNING

7.1 Vad måste kontrolleras?

Noggrann driftskontroll är nödvändig för att snabbt kunna åtgärda brister hos en infiltrationsanläggning. Vanligt är att installationer som ventiler, nivåvakter o dyl fungerar mindre tillfredsställande och därför blir begränsande för en anläggnings funktion. Igen-sättning är en annan faktor som kontinuerligt måste kontrolleras och åtgärdas.

Olika kontrollmätningar måste återkommande utföras för att en riktig bedömning skall kunna göras av infiltrationens effekter eller brist på effekter.

Observationer som skall utföras är

- grundvattennivåmätningar
- porvattentryckmätningar
- sättningsmätningar
- registrering av infiltrerad vattenmängd
- läckagemätningar till berganläggning el dyl
- registrering av förändringar av infiltrationsvattnets sammansättning

7.2 Olika kontrollmätningar

Grundvattennivåmätningar utförs i observationsrör vilka placeras i närheten av infiltrationsbrunnen eller infiltrationspunkten. Ett rör bör placeras maximalt 5 m från brunnen. I övrigt bestäms observationsrörens läge av avsänkningens utsträckning och förekommande bebyggelse, vägar etc.

Observationsrören måste ha god hydraulisk kontakt med den akvifer i vilken vatten infiltreras. De bör med vissa intervall genomgå funktionskontroll. Rören bör lämpligtvis vara två tum i diameter, vilket medger vattenprovtagning.

Mätning av de naturliga och av dräneringen opåverkade grundvattenfluktuationerna bör göras i någon punkt inom eller i anslutning till infiltrationsområdet. Nät för sådana observationer finns i Göteborg och Stockholm. Dessutom finns ett glesare riksomfattande grundvatten-

nät, se FIG 37. Mätningarna utförs i Sveriges Geologiska Undersökningens (SGUs) regi. Grundvattennivån följer olika mönster för årstidsvariationer inom olika områden i landet. Dessa mönster framgår av FIG 38.

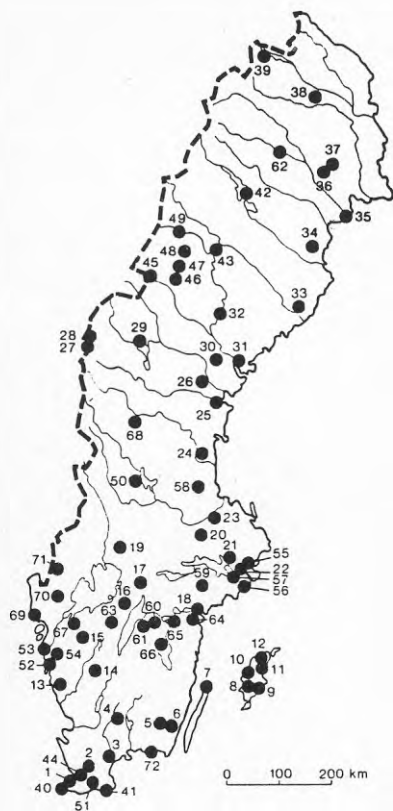


FIG 37. SGUs Grundvattennät.

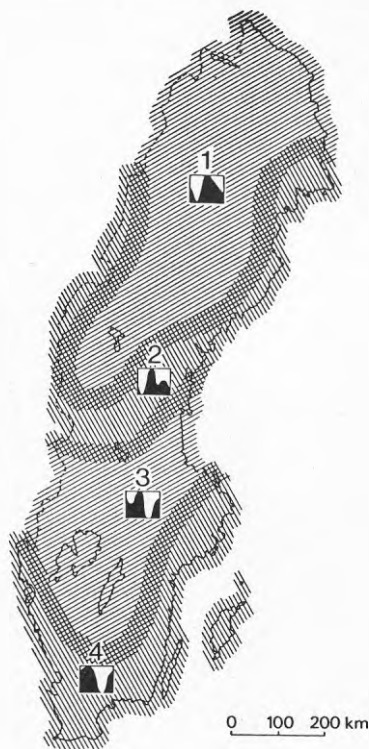


FIG 38. De fyra huvudmönstren för årstidsmässiga variationer i grundvattenstånd. Rutornas höjd motsvarar skillnaden mellan högsta och lägsta månadsmedelvärden. Diagrammens längd är kalenderåret.

Porvattentryckmätning i lera utförs med porvattentryckmätare. Portrycksförändringar i lera är vanligtvis långsamma och de största förändringarna sker intill de lager vari infiltrationen utförs. Det är därför av vikt att portryckmätarna placeras i de lager där avsänkningen noterats och där förändringar förväntas på grund av infiltration. Någon portrycksreferenspunkt bör etableras inom eller i anslutning till området för att bedöma naturliga fluktuationer. I Göteborg och Stockholm etableras för närvarande ett nät för portrycksregistrering.

Under infiltration måste *specifika kapaciteten* hos brunnen registreras, dvs såväl infiltrationstryck som flöde. Infiltrationstryck bör mätas med en noggrannhet på någon centimeter vattenpelare. Infiltrationsflödet registreras kontinuerligt med en vattenmätare.

För att få en riktig uppskattning av igensättningen bör kapacitetstest utföras, se avsnitt 7.3.

Vattenprovtagning utförs på inkommande vatten före och efter eventuell behandling samt i vissa observationsrör. Vattenprovtagning utförs enligt standardiserade metoder, se avsnitt 6.

Läckagemätningar utförs i den eller de anläggningar som orsakar grundvattensänkningen.

7.3 Kapacitetstest

Kapacitetstest görs för att bestämma en brunns kondition. På grund av igensättningar förändras normalt en infiltrationsbrunns kapacitet med tiden, skineffekten ökar. Med konstant infiltrationsflöde kommer då erforderligt infiltrationstryck att stiga. Denna effekt kan enkelt uttryckas som en ökning av specifika kapaciteten Q/s_w .

En infiltrationsbrunns kondition kan aldrig beskrivas enbart med infiltrationsflödets förändring utan flödet måste alltid sättas i relation till infiltrationstrycket.

Ett kapacitetstest kan sägas bestå av en provpumpning under kort tid där avsänkningen i brunnen observeras under det att brunnen pumpas med en konstant kapacitet. Testet kan även utföras under infiltration i stället för pumpning. Avsänkningen byts då ut mot en höjning i brunnen.

Genom teoretisk behandling kan observerad data värderas så att uttryck erhålls för effektivitetstal, η , och igensättningsfaktor, $1-\eta$ (kapitel 5.2.1).

Definitionen av de tre parametrarna är:

$$\text{Effektivitetstal } \eta = \frac{\ln \frac{R_0}{r_w}}{\ln \frac{R_0}{r_w} + \xi}$$

R_0 = influensradie
 r_w = brunnsradie
 ξ = skinfaktor

$$\text{Igensättningsfaktor } 1-\eta = \frac{\xi}{\ln \frac{R_0}{r_w} + \xi}$$

För en bra brunn med liten skineffekt är η nära nog 1 och härmed igensättningsfaktorn ≈ 0 . För en igensatt brunn med stor skineffekt närmar sig η -värdet 0 medan igensättningsfaktorn närmar sig värdet 1.

En brunn vars effektivitetstal har sjunkit till $\eta \leq 0,5$ bör rensas så att η stiger till närmare 1. För detta krävs en väl utprovad rensningsmetod, se kapitel 5.3.

Två huvudmetoder av kapacitetstest finns:

- o Absolut bestämning av igensättningsfaktorn.
- o Relativ bestämning av igensättningsfaktorn med hjälp av jämförelser mellan olika tidpunkter.

I det följande redovisas för kapacitetstest i form av pumpning.

Absolut bestämning av igensättningsfaktorn

Avsänkning eller höjning av vattennivån i en brunn är tidsberoende. Vid konstant kapacitet kan för korta tider avsänkningen beräknas som:

$$s_w = \frac{Q}{2\pi T} \left(\frac{-\ln u - 0,5772}{2} + \xi \right),$$

$$\text{där } u = \frac{r_w^2 S}{4Tt}$$

övriga beteckningar enligt avsnitt 5.

Avsänkningen kommer i ett halvlogaritmiskt diagram att avbildas som en rät linje. Under inledningen avviker emellertid kurvan från linjen på grund av att den vattenvolym som finns i brunnen först måste tömmas ur (se FIG 39). Denna volym kallas WBS (Well Bore Storage) och ger en rät linje med lutningen 1:1 i ett dubbellogaritmiskt diagram, se figuren nederst.

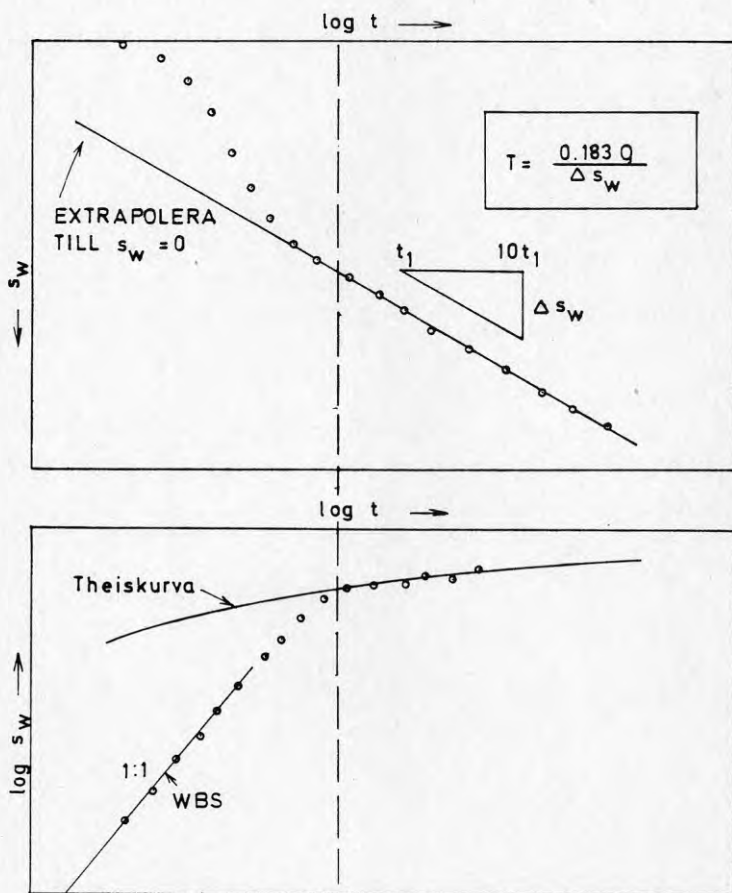


FIG 39. Avsänkningen i en uttagsbrunn, halvlogaritmisk (överst) respektive logaritmisk avbildning (nederst).

Från den halvlogaritmiska avbildningen kan transmissiviteten, T , bestämmas med kännedom om pumpkapaciteten, Q , och Δs_w , se FIG 39 enligt:

$$T = \frac{0,183 Q}{\Delta s_w}$$

Tillskottsavsänkning, s_s , på grund av igensättning, är ej tidsberoende i det korta perspektiv som testen omfattar utan kommer att ligga med som ett konstant tillskott under hela testet, se FIG 40.

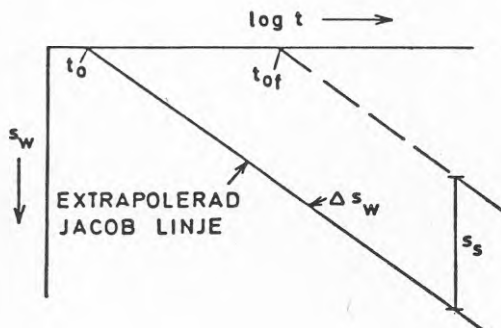


FIG 40. Bestämning av skinfaktor.

Under ideala förhållanden, utan skineffekt, kan den räta linjens skärning med tidsaxeln beräknas ske vid tiden:

$$t_{of} = \frac{S r_w^2}{135T} \text{ (min)}$$

Med skineffekt kan skärningen efter extrapolation bestämmas till t_0 , varvid skinfaktorn bestäms enligt:

$$\xi = 1,15 \log t_{of}/t_0$$

Den ovan angivna metoden förutsätter att en rimlig uppskattning av magasinskoefficienten, S , kan göras för att kunna ange t_{of} . Dessutom måste täta mätningar av vattennivån utföras under testet.

Igensättningsfaktorn, $1-\eta$, beror av ξ , och beräknas enligt

$$1-\eta = \frac{\xi}{\ln R_0/r_w + \xi}$$

där R_0 = influensradie

r_w = brunnsradie

Denna typ av test bör första gången utföras då brunnen är klar att tas i drift för att kontrollera brunnens funktion från start. Vid varje test bör man se till att vattennivån i brunnen ställt in sig med omgivande grundvattennivå, dvs en stabil grundvattenyta bör ha utbildats.

Relativ bestämning av igensättningsfaktorn

Den specifika kapaciteten Q/s_w är en funktion av områdets geo- hydrologiska förhållanden och skinfaktorn enligt:

$$Q/s_w = \frac{2\pi T}{Tn R_0/r_w + \xi}$$

Formeln ger vissa möjligheter att uppskatta igensättningar genom att med jämna tidsmellanrum mäta den specifika kapaciteten. Antas skinfaktorn ξ vara låg (~ 0) då brunnen är ny kan effektivitetstalet η vid varje senare pumpning beräknas enligt:

$$\eta = \frac{(Q/s_w)_n}{(Q/s_w)_0} = \frac{\text{aktuell specifik kapacitet}}{\text{specifik kapacitet hos nyanlagd brunn}}$$

Igensättningsfaktorn, beräknas därefter som $1-\eta$.

För att erhålla jämförbara värden på specifika kapaciteten vid två olika tidpunkter, $t = 0$ och $t = n$, krävs ett noggrant förfarande vid testet. Följande schema kan följas:

- o Testet bör starta först efter att en stabil grundvattennivå råder i och utanför brunnen.
- o Pumpningen startas med konstant pumpkapacitet, Q .
- o Avsänkningen, s_w , avläses efter 1-2 timmar. Den valda tiden måste vara exakt densamma vid varje test! Detta på grund av att avsänkningen är tidsberoende.
- o Beräkning av specifika kapaciteten Q/s_w .

Testet utförs mycket enkelt genom infiltration då det endast krävs ett avbrott i driften för att erhålla den stabila grundvattennivån. Efter avläst höjning, s_w , kan man fortsätta driften utan vidare avbrott.

7.4 Tillsyn och skötsel

Tillsyn och skötsel av djupinfiltrationsanläggning måste ske med fasta intervall för att minska risken för driftstopp.

Följande schema bör följas:

- Vid start av en anläggning kontrolleras flöde och tryck 1 gång/dag.

Under drift bör följande schema följas:

- 1 gång/vecka observeras och kontrolleras:
 - infiltrationstryck
 - infiltrationsflöde
 - grundvattennivå i brunnens närhet
 - funktionen hos ventiler, nivåvakter och filter
- 1 gång/månad kontrolleras
 - grundvattennivå
 - portryck
 - sättningar
- 1 gång/år utförs kapacitetstest enligt avsnitt 7.3.
- 1 gång/år utförs rensning av brunnen samt rengöring av ventiler och mätare. I samband med rensningen utförs kapacitetstest (före och efter rensningen).

Inträffar något oförutsett måste naturligtvis en utvärdering av orsaken göras omedelbart. En igensättning kan bero på något som ej omnämns i denna rapport och en analys av orsaken måste därför grundas på såväl kemiska som hydrauliska observationer.

Det kan inte nog poängteras vikten av en regelbunden tillsyn. Bristande skötsel och tillsyn av djupinfiltrationsanläggningar har varit orsak till att många avbrott inte upptäckts i tid för att förhindra negativa konsekvenser.

8 EKONOMISKA ASPEKTER PÅ DJUPINFILTRATION

En generell bild av kostnaderna för att använda djupinfiltration är knappast möjligt att ge. Orsaken är främst att kostnaderna i hög grad beror av de lokala förhållandena. Det är vidare inte möjligt att ange kostnader som en form av alternativkostnad till andra åtgärder som t ex grundförstärkning. Vad som kan anges är priser för brunnar och andra delar av en anläggning och vissa riktlinjer för skötsel- och underhållskostnader. Detta ger möjlighet för den enskilde användaren att uppskatta vad djupinfiltrationen kommer att kosta i varje särskilt fall.

Undersökningskostnader

Undersökningar för en djupinfiltrationsanläggning ingår som regel i en större undersökning och man kan därför förutsätta att geotekniska och geologiska undersökningar över området är så omfattande att endast vissa kompletteringar erfordras för infiltrationsanläggningen. Vissa kostnader kan anges (1979 års prisnivå).

Brunn i jord

Provtagning för infiltrationsbrunn \varnothing 50 mm	300 - 400 kr/m
--	----------------

Berghål

Borrning av hål direkt i berg \varnothing 51 mm	20 - 30 kr/m
---	--------------

Borrning av hål genom jord \varnothing 125 mm	100 - 150 kr/m
---	----------------

Vattenförlustmätning inklusive manschett (manschetten kan senare utnyttjas för permanent drift)	1000 - 2000 kr
--	----------------

Eablering	2000 - 3000 kr
-----------	----------------

Rådgivning

Dimensionering av brunn	3000 - 4000 kr
-------------------------	----------------

AnläggningskostnaderBrunn i jord

Etablering av borrhustrustning	4000 - 5000	kr
Rörborrning \varnothing 130 mm	300 - 400	kr/m
Filtorrör \varnothing 108 mm x 1 m	ca 1000	kr
Rörborrning \varnothing 170 mm	500 - 600	kr
Filtorrör \varnothing 143 mm x 1 m	ca 1500	kr
Renspumpning	4000 - 5000	kr
Brunnskammare (nedgrävd)	5000 - 7000	kr
Installationer inkl. montering	5000 - 10000	kr
reduceringsventil		
backventil		
avstängningsventil		
manometer		
vattenmätare		
avlufningsventil		
Nedgrävd tillförselledning för infiltrationsvatten	150 - 200	kr/m

Berghål

Etablering (kan slopas om arbetena utförs i samband med tunnelsprängningen)	2000 - 3000	kr
Borrning av hål	20 - 30	kr/m
Manschett inkl. montering	1000 - 2000	kr
Renspumpning	2000 - 3000	kr
Installationer enligt ovan	5000 - 10000	kr

Om läckagevatten från berganläggningen utnyttjas som infiltrationsvatten

Ringpumpar 2 st à 2000 kr	ca 4000	kr
Automatik, pumpar	1500 - 1000	kr
Tillförselledning i tunnel för infiltrationsvatten	20 - 30	kr/m

Konsultation och kontroll i samband med start av anläggningen 5 dagar

5000 - 6000 kr

Drift- och underhållskostnader

Även för driftskostnaderna måste den ungefärliga nivån anges. En stor post i detta sammanhang är kostnaden för infiltrationsvattnet. Som riktvärde bör användas konsumtionspriset, utan avloppsavgift, för vatten på orten. Alternativa vattenförsörjningsmöjligheter bör emellertid övervägas, t ex inläckande grundvatten.

För skötsel och underhåll kan följande riktvärden gälla (1979 års pris)

Rensning av infiltrationsbrunn samt rengöring av installationer	4000 - 5000	kr/gång
Kemisk behandling i samband med rensning	1000 - 2000	kr/gång
Rensning av bergborrhål samt rengöring av installationer	2000 - 3000	kr/gång
Underhåll av pump	1000 - 2000	kr/år
Veckotillsyn av djupinfiltrationsanläggning ca	1000	kr/mån
Avläsning av porvattentryck och grundvattennivå 1 gång/månad	1000 - 1500	kr/mån
Utvärdering och dokumentation	ca	500 kr/mån

Exempel:

För att ge en bild av kostnaderna för olika typer av djupinfiltrationsanläggningar ges följande två exempel. De är i princip baserade på exemplen givna under avsnitt 5.5.

Exempel 1 (brunn i jordlager, 20 m djup)Undersökning

Provtagning \emptyset 50 mm, 20 m	20 m x 300 kr	= 6000:-
Dimensionering av brunn		3000:-

Anläggning

Etablering av borrustrustning		4000:-
Rörborrning \emptyset 130 mm	20 m x 300 kr	= 6000:-
Filtorrör, 1 m		1000:-
Vattenledning, 30 m	30 m x 200 kr	= 6000:-
Brunnskammare		5000:-
Installationer inkl. montering		7000:-
Konsultation vid start av anläggning		5000:-
		<hr/>
		43 000:-

Drift

Rensning 1 gång/år	4000:-
Tillsyn	12000:-
Avläsning av gvt och pvt, 1 gång/mån	1000 kr x 12 ggr = 12000:-
Utvärdering och dokumentation	500 kr x 12 ggr = 6000:-
Infiltrationsvatten ä 2 kr/m ³ (ca 50% av hela avgiften) antag 10 m ³ /dag	3600 m ³ ä 2 kr = <u>7000:-</u>
	41000:-/år

Exempel 2 (2 borrhål, 30 m långa intill varandra. 2 hål borrades i vilka inget vatten kunde tryckas in).

Undersökning = Anläggning (det förutsätts att borrhålen görs samtidigt som bergsanläggningen utförs samt att det är möjligt att bibehålla en djupinfiltrationsanläggning i berganläggningen.)

Etablering	2000:-
Borrning 2 hål, 30 m	2 x 20 kr x 30 m
	1200:-
Borrning 2 hål, 30 m (misslyckade hål)	2 x 20 kr x 30 m
	1200:-
Manschett inkl. montering, 2 st	3000:-
Provtryckning 4 hål	3000:-
Renspumpning	2000:-
Installationer inkl. montering (samma installationer utnyttjas för båda hålen)	5000:-
Tillförselledning, 200 m	20 kr x 200 m = 4000:-
Pumpar, 2 st	4000:-
Automatik till pumpar	1000:-
Konsultation vid start av anläggning	5000:-
	<hr/>
	31 400:-

Drift

Rensning 1 gång/år	2000:-
Underhåll av pumpar	1000:-
Tillsyn	12000:-
Avläsning av gvt och pvt 1 gång/mån	12000:-
Utvärdering och dokumentation	6000:-
Infiltrationsvatten	<u>0:-</u>
	33000:-

För de angivna exemplen blir sålunda kostnaderna:

	Infiltration i jord med kommunalt renvatten	Infiltration i berg med in- läckande grundvatten
Anläggning	43 000 kr	31 000 kr
Drift	41 000 kr/år	33 000 kr/år

Härav framgår att driftkostnaderna är den tyngsta posten vid utförande av sådana här anläggningar. Det tjänar således inte mycket till att spara på kostnaden för t ex brunnen. Tvärtom har det visat sig att ofta ger dåligt fungerande brunnar kraftigt förhöjda driftkostnader.

Ovanstående kostnader för en infiltrationsanläggning skall jämföras med kostnader för sättningskador på ett eller flera hus som kan uppgå till flera miljoner kronor.

9 BILAGOR

Begrepp och benämningar som utnyttjas i denna rapport beskrivs eller definieras nedan. Definitionerna bygger i görligaste mån på vedertagna definitioner vanligen enligt TNC-ordlistor.

AKVIFER

Geologisk bildning som är så genomsläpplig att grundvatten kan utvinnas ur den för praktiska ändamål.

BRUNNSTRYCK, h_w (meter vattenpelare)
absoluttryck i infiltrationsbrunn

DJUPINFILTRATION

Konstgjord grundvattenbildning genom brunnar, borrhål eller tunnlar.

GRUNDVATTENNIVA, h (m)

Grundvattnets trycknivå i en sluten eller öppen akvifer i förhållande till ett referensplan.

GRUNDVATTENZON

Zon i berg eller jord inom vilken alla hålrum är fyllda med vatten. Vatten har ett tryck som är lika med eller större än atmosfärstrycket.

HYDRAULISK GRADIENT, i (dimensionslös)

Trycknivåns ändring längs grundvattnets flödesbana.

HYDRAULISK KONDUKTIVITET

Se permeabilitet.

INFILTRATION

Vattnets nedträngning genom markytan.

INFILTRATIONSFLÖDE, Q (m^3/s)

Den mängd vatten per tidsenhet som tillföres en akvifer, medelst konstgjord grundvattenbildning.

INFILTRATIONSKAPACITET, SPECIFIK Q/s_w (m^2/s)

Förhållandet mellan infiltrationsflödet och infiltrationsstrycket. Q/s_w är tidsberoende.

INFILTRATIONSTRYCK, s_w (meter vattenpelare)

Skillnad mellan vattennivån i brunnen före och under djupinfiltration.

s_w är tidsberoende. $s_w = h_w - h_0$

KONSTGJORD GRUNDVATTENBILDNING

Förstärkning av en grundvattentillgång genom att vatten tillförs grundvattenmagasinet via särskilt anlagda brunnar, dammar o dyl.

MAGASINSKOEFFICIENT, S (dimensionslös)

Den vattenvolym som avges eller magasineras per enhetsarea då grundvattennivån ändras en enhet.

PERKOLATION

Vattnets nedträngning från markytan till grundvattenytan.

PERMEABILITET, k (m/s) (HYDRAULISK KONDUKTIVITET)

Grundvattenflöde genom en enhetsyta vinkelrätt mot flödesriktningen under gradienten ett.

PIPING

Erosion orsakad av att infiltrerat vatten strömmar uppåt längs brunnsröret till mer genomsläppliga ytliga jordlager.

POROSITET, n (dimensionslös)

Kvoten av den samlade hålrumsvolymen i en geologisk bildning och dess totala volym.

PORTRYCK, u (kPa)

Trycket hos porvatten och porgas i en punkt i porvattenzonen (jfr grundvattennivå).

PORVATTENZON

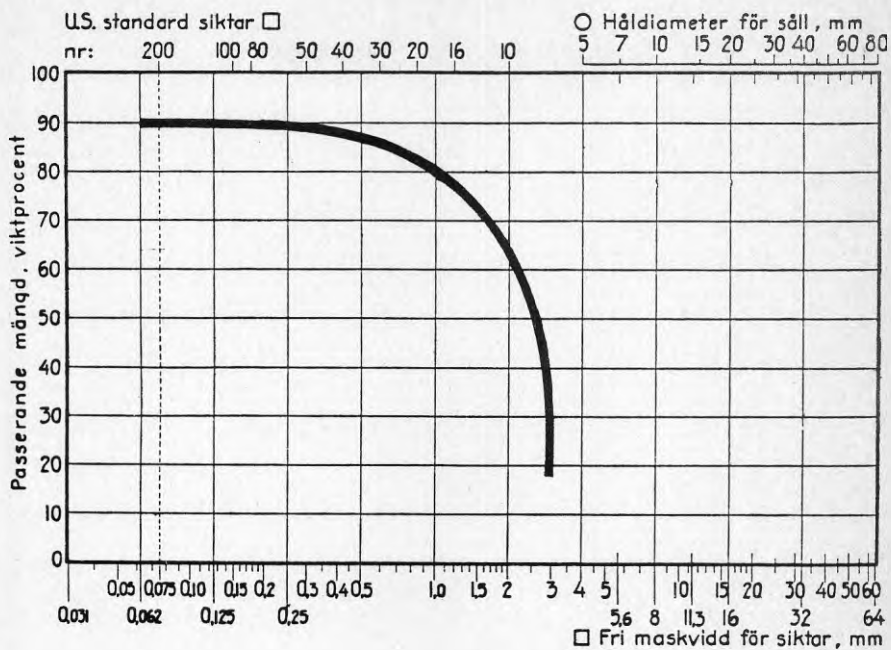
Grundvattenzon i kohesionsjordar (jordarter med låg permeabilitet).

TRANSMISSIVITET, T (m^2/s)

Grundvattenflöde genom en sektion med enhetsbredd vinkelrätt mot flödesriktningen under gradienten ett.

$T = \int_H k \, dh$ där H = mäktigheten hos den vattenmättade delen av akviferen.

Bilaga 2



KENNKORNLINJEN

för bestämning av kornstorlek på grusfilter
(Bieske, 1961).

Analys av suspenderat material

Undersökningsmetodiken för att bestämma kvalitetstalet w/k_C och filtreringskurvan enligt kapitel 6.2.2 diskuteras nedan. Analysen utförs som en filtrering av infiltrationsvattnet genom membranfilter med porstorlek 0,45 μm under konstant tryck.

Bestämning av kvalitetstalet w/k_C

Att använda membranfilter för gravimetrisk analys är inte helt oklanderligt varför ett noggrant schema måste följas för att få entydiga resultat. Membranfilter har egenskapen att dels förlora vikt under filtrering och torkning, dels att vara hygroskopiskt efter torkning.

Följande förfarande bör tillämpas för att bestämma mängden, w , suspenderat material med viktkonstanta membranfilter.

1. Skölj filtret med 10 ml destillerat vatten tre gånger.
2. Torka filtret i 105°C i 30 minuter.
3. Låt filtret svalna i exsickator i ca 15 minuter.
4. Väg filtret.
5. Filtrera infiltrationsvattnet genom filtret under konstant tryck.
6. Upprepa punkt 2-4.

Carter et al. (10) anger att membranfilter typ Millipore MF förlorar ca 1% av sin vikt om man inte tvättar filtret enligt punkt 1, annars ca 0,3% (ursprungsvikt = 30 mg). Under torkning minskar filtret i vikt kontinuerligt varför det är viktigt att alltid hålla tiden 30 minuter exakt.

Den volym V som filtreras genom filtret registreras med tiden och en kurva $V \sim \sqrt{\text{tiden}}$ plottas enligt FIG 3:1. Ur kurvan erhålls lutningen S . Vattnets kvalitetstal k_C beräknas sedan från följande uttryck

$$\frac{w}{k_C} = \frac{1}{S^2} \left(\frac{2\rho_c A_c^2 \Delta p}{10 \mu \rho_w} \right) \quad \left(\frac{\text{S}}{\text{m}} \right)$$

där w fås gravimetriskt från filtreringen.

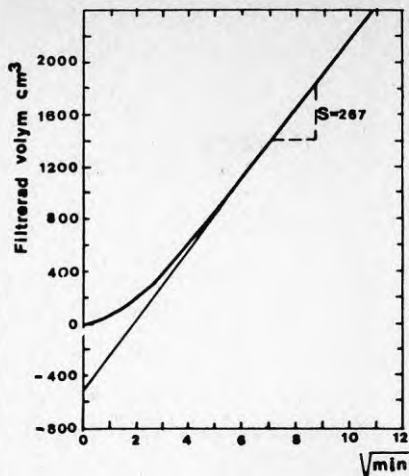


FIG 3:1 Exempel på filtreringskurva.

Tryckets storlek som appliceras över filtret under filtreringen är mindre viktigt för resultatet och inverkar endast på filtreringstiden. Som tryckkälla kan antingen vattenledningstrycket utnyttjas direkt enligt figur 3:21 eller så kan en behållare med konstant trycknivå användas enligt figur 3:22, vilket kan vara att föredra i fält, eller som tredje alternativ kan filtreringen utföras under vacuum, figur 3:23.

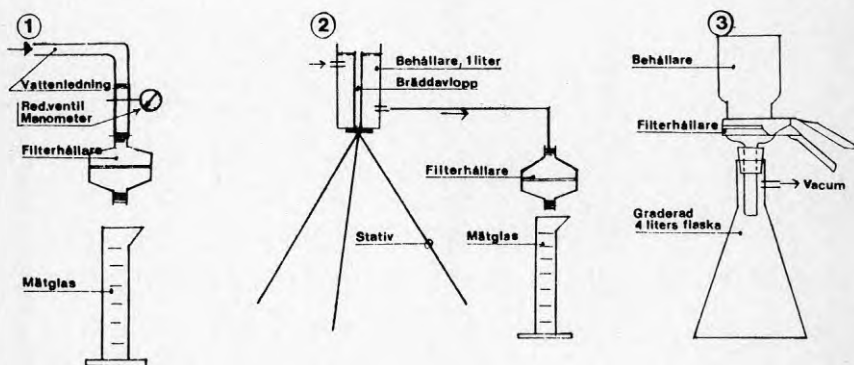


FIG 3:2 Mätutrustning vid analys av suspenderat material.

Studium av filtreringskurvan

I vissa fall kan vikten av det suspenderade materialet vara så liten att noggrannheten vid vägningen blir liten. Det är då mer relevantt att enbart studera filtreringsförloppet, dvs genomströmd vattenvolym per tidsenhet. $q \sim t$, där q är filtrerad volym per tidsenhet och t är löpande filtreringstid, FIG 3:3.

Ett vatten karakteriseras då efter hur lång tid, t , det tar att komma till den flacka kurvan samt hur stor volym per tidsenhet, q_t , som filtret då släpper igenom. Vid jämförelse mellan flera vatten kan man på så vis välja det vatten som är bäst ur infiltrationssynpunkt. Ett bra vatten karakteriseras av att det tar lång tid tills den flackare linjen nås samt att q_t är så stort som möjligt. Då q är direkt proportionell mot trycket över filtret och filtrets area måste kurvan alltid relateras till samma tryck och area för att en jämförelse mellan flera kurvor skall kunna göras.

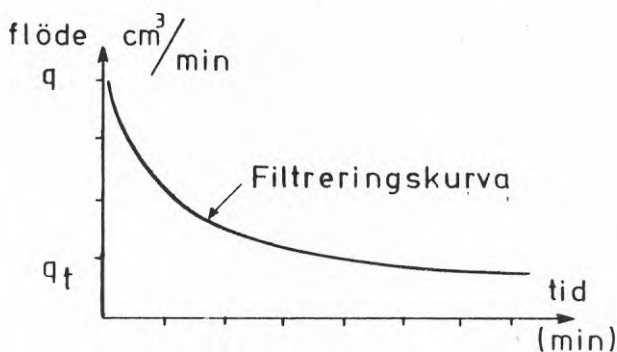


FIG 3:3. Filtrerad vattenvolym per tidsenhet som funktion av total filtreringstid.

NOMENKLATUR

- w viktkoncentration suspenderat material i infiltrationsvattnet (mg/l)
- k_c permeabiliteten hos den filterkaka av susp.materiel som bildas vid filtrering med membranfilter (m/s)
- ρ_c filterkakans skrymdensitet (kg/m³)
- A_c filterkakans area (m²)
- Δp total tryckdifferential över membranfiltret (N/m²)
- μ vattnets viskositet (Ns/m)
- ρ vattnets densitet (kg/m³)

Bilaga 4

Tabell: Löslighet av luft i vatten (ml/l).

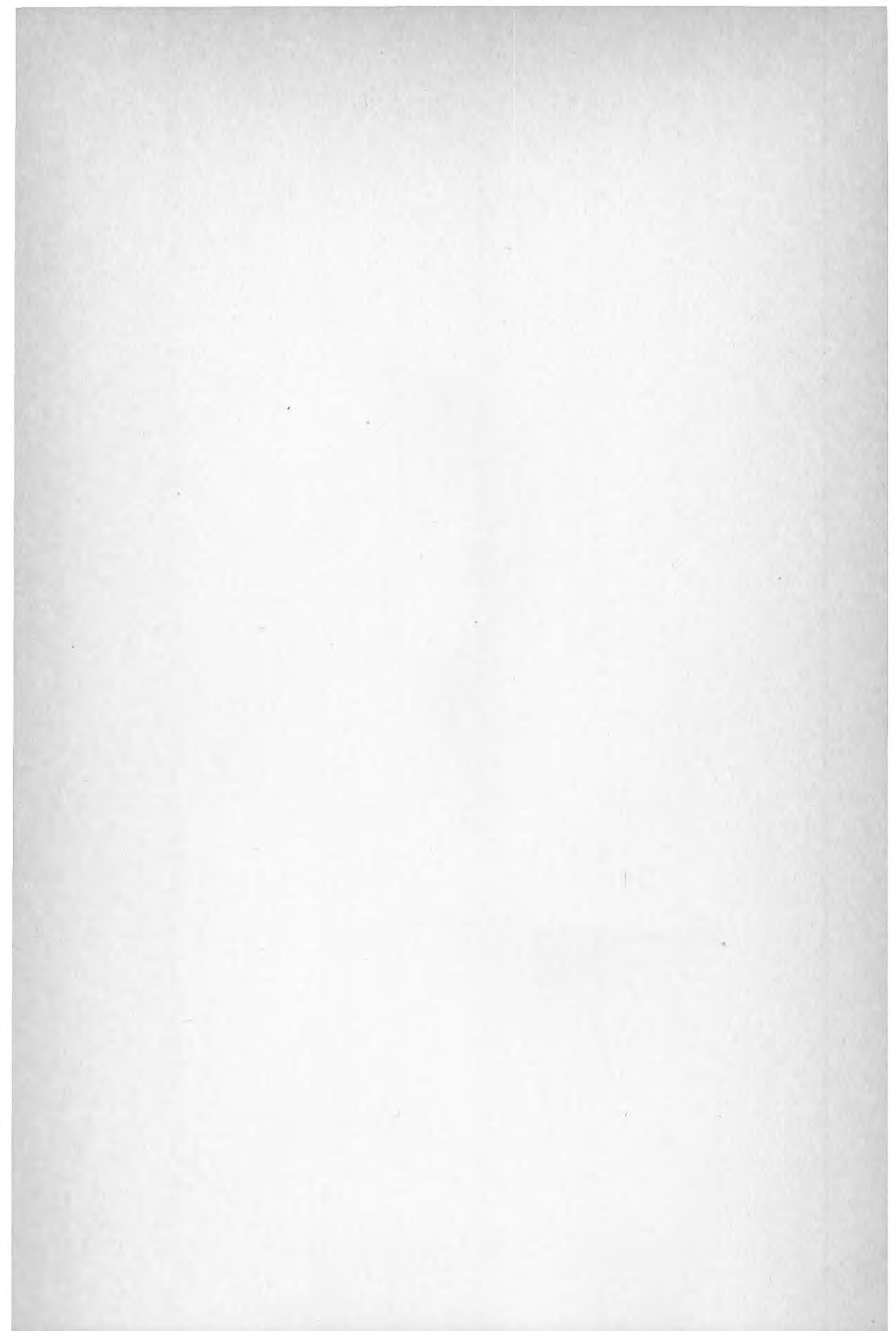
Temp/tryck	1 atm	2 atm	därrav % syre
0 °C	29.18	58.36	34.91
1	28.42	56.84	34.87
2	27.69	55.38	34.82
3	26.99	53.98	34.78
4	26.32	52.64	34.74
5	25.68	51.36	34.69
6	25.06	50.12	34.65
7	24.47	48.94	34.60
8	23.90	47.80	34.56
9	23.36	26.72	34.52
10	22.84	45.68	34.47
11	22.34	44.68	34.43
12	21.87	43.74	34.38
13	21.41	42.82	34.34
14	20.97	41.94	34.30
15	20.55	41.10	34.25
16	20.14	40.28	34.21
17	19.75	39.50	34.17
18	19.38	38.76	34.12
19	19.02	38.04	34.08
20	18.68	37.36	34.03
21	18.34	36.68	33.99
22	18.01	36.02	33.95
23	17.69	35.38	33.90
24	17.38	34.76	33.86
25	17.08	34.16	33.82
30	15.64	31.28	33.60

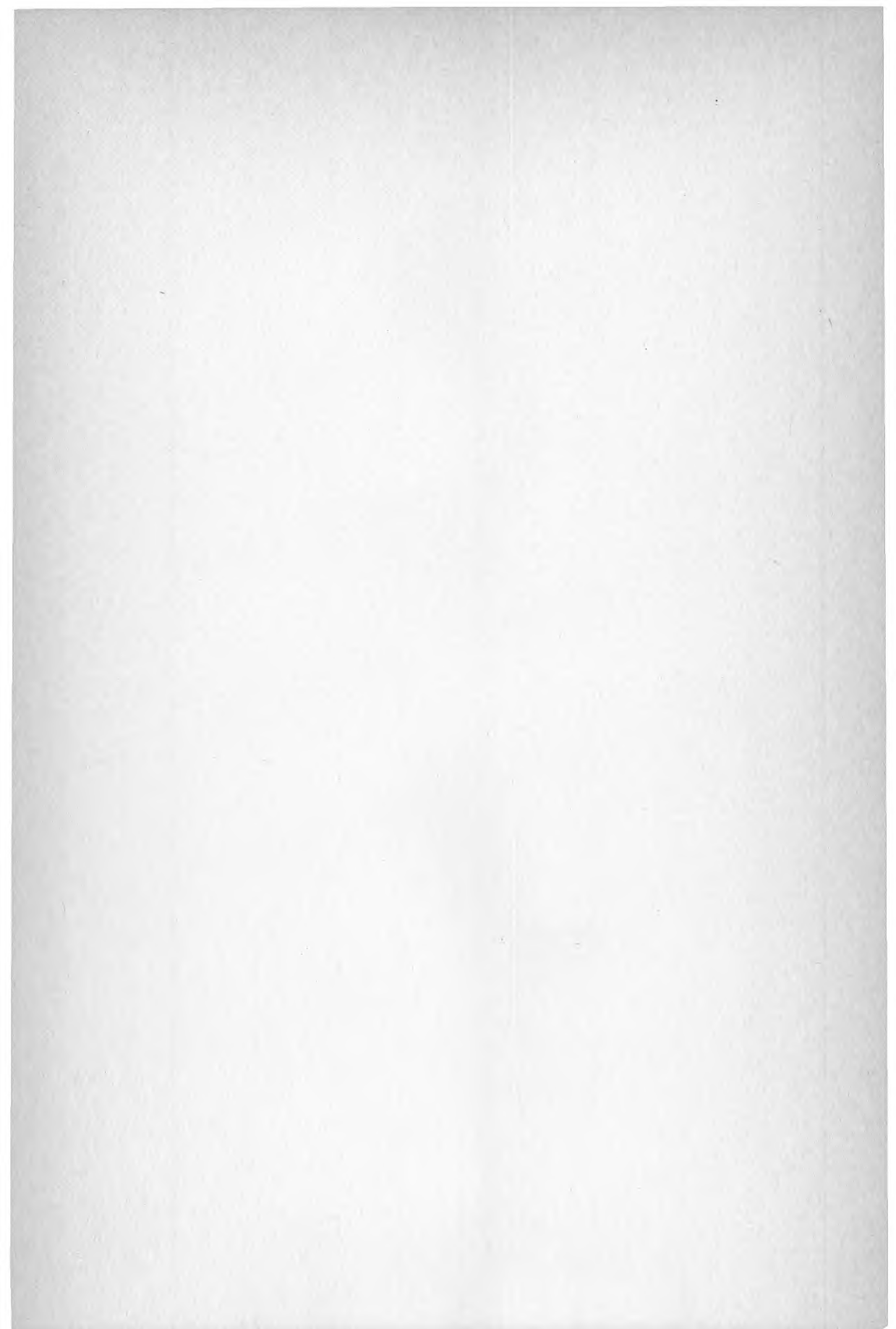
10. REFERENSER

1. ANDERSSON, A-C, BERTSSON, J, 1979.
Kontrollerad grundvattenbalans genom djupinfiltration. En inventering av djupinfiltrationsprojekt. - Geohydrologiska forskningsgruppen. Chalmers Tekniska Högskola, Meddelande nr 26. Göteborg.
2. ARULANANDAN, K, LOGANATHAN, P, KRONE, R B, 1975.
Pore and Eroding Fluid Influences on Surface Erosion of Soil. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 101 No. GTI, Proc. Paper 11078, sid 51-66.
3. BARKMAN, J H, DAVIDSSON, D H, 1972.
Measuring Water Quality and Predicting Well Impairment. Journal of Petroleum Technology. July 1972, sid 865-873.
4. BERGMAN, G, 1975.
Djupinfiltration i berg från tunnlar. Bergkonsult Sven Tyrén AB. Stockholm 1975-06-19. Rapport till Statens råd för byggnadsforskning.
5. BIESKE, E, jr, 1961.
Zur Schüttkornbestimmung bei Kiesschüttungsbrunnen, Bohrtechnik, Brunnenbau, Rohrleitungsbau. Heft 9.
6. BROMS, B, FREDRIKSSON, A, CARLSSON, L, 1976.
Land Subsidence in Sweden due to Water-leakage into Deep-lying Tunnels and Its Effects on Pile Supported Structures. - Second International Symposium on Land Subsidence, Anaheim, 1976. IAHS Publ. No. 121, sid 375-387.
7. BUCHT, E, CARLSSON, L, FALK, J, HÄLLGREN, J, MALMQUIST, P-A, 1977.
Dagvatten - Resurs och Belastning. Naturvårdsverket, SNV, PM 873.
8. CARLSSON, L, 1969.
Jordarters sammansättning samt deras fysikaliska och kemiska egenskaper. Geologiska institutionen, Chalmers Tekniska Högskola. Publ. 69:4. Göteborg.
9. CARLSSON, L, 1978.
Djupinfiltrationsstudier i Angered. Geohydrologiska forskningsgruppen. Chalmers Tekniska Högskola. Meddelande nr 29. Göteborg.
10. CARTER, M J, HUSTON, M, LOGSDON II, O J, 1976.
Micromethods for the Determination of Nonfilterable and Filterable Residues. Journal Water Pollution Control Federation. Vol. 48, No. 4, sid 652-659.
11. EJERHOM, K-G, SPÅNGBERG, B, SVENSSON, P L, 1977.
Kontroll av grundvattennivån genom infiltration via tunnel - ett fullskaleförsök. Statens råd för byggnadsforskning. Rapport R58:1977. Stockholm.

12. HANDBOOK of CHEMISTRY and PHYSICS, 44th Edition. The Chemical Rubber Publishing Co. Cleveland.
13. HARPAZ, Y, 1971.
Artificial Groundwater Recharge by means of Wells in Israel. Journal of Hydraulics Division, ASCE, Vol. 97, No. HY 12. Proc. Paper 8579, sid 1947-1964.
14. HEM, J D, CROPPER, W H, 1959.
Survey of Ferrous-ferric Chemicals Equilibria and Redoxpotentials. United State Geological Survey Water Supply Paper No. 1459-A, Washington.
15. HEM, J D, 1960.
Chemical Equilibrium Diagrams for Ground Water Systems. Bull. Int. Ass. Scient. Hydrol., 19, sid 43-53.
16. HEM, J D, 1961.
Stability Field Diagrams as Aids in Iron Chemistry Studies. Journal American Water Works Association. February 1961, sid 211-229.
17. JACOB, C E, LOHMAN, S W, 1952.
Nonsteady Flow to a Well of Constant Drawdown in an Extensive Aquifer. - Am. Geophys. Union Trans. Vol. 33, sid 559-569.
18. JANSSON, B, WINQVIST, T, 1976.
Undermarksplanering. - Statens råd för byggnadsforskning, Rapport T8:1978.
19. LINDSKOUG, N-E, NILSSON, L-Y, 1974.
Grundvatten och byggande. Statens råd för byggnadsforskning. R20:1974, Stockholm.
20. ORMEROD, K, 1974.
Problemer med slam og dyr i distribusjonsnett for vann. Norsk Institutt for Vannforskning. Temarapport 2, OSLO.
21. RIISE, P, GEDDA, C, 1976.
Djupinfiltration av vatten i jord. Bearbetning av erfarenheter från praktiska prov. Statens råd för byggnadsforskning. Rapport R43:1976. Stockholm.
22. WEIJMAN-HANE, G, ALMESTRAND, A, BJÖRKMAN, A, HERNEBRING, C, 1973.
Kompendium i VA-teknik del IV. Institutionen för vattenförsörjnings- och avloppsteknik, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg.
23. WYCKOFF, R D, BOTSET, H G, 1936.
The Flow of Gas-liquid Mixtures through Unconsolidated Sands. Physics, 7, September 1936, sid 325-345.

Samt interna handlingar inom olika konsultföretag.





**Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 750945-4
från Statens råd för byggnadsforskning till Inst. för
VA-teknik, CTH, Göteborg.**

R166: 1980

ISBN 91-540-3406-X

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

Art.nr: 6700266

**Abonnemangsgrupp:
W. Installationer**

**Distribution:
Svensk Byggtjänst, Box 7853
103 99 Stockholm**

Cirkapris: 30 kr exkl moms