

SVERIGES GEOLOGISKA UNDERSÖKNING

SER. Ag

HYDROGEOLOGISKA KARTBLAD

Nr 10

ÅKE MÖLLER, PER ENGQVIST OCH
JAN-ERIK ANDERSSON

HYDROGEOLOGISKA FÖRHÅLLANDEN
INOM ÖSTERGÖTLANDS
SEDIMENTÄRA BERGGRUND

MED FEM PLANSCHER

SKALA 1:100 000

HYDROGEOLOGICAL CONDITIONS WITHIN THE SEDIMENTARY
BEDROCK OF ÖSTERGÖTLAND
WITH FIVE PLATES
SCALE 1:100 000



UPPSALA 1981

För information om berggrund och jordarter hänvisas till berggrundskartor (SGU serie Af) samt jordartskartor (SGU serie Ae).

På beställning utför SGU även geologiska och hydrogeologiska specialundersökningar rörande grus- och sandförekomster, grundvatten, mineral, miljövard m.m.

Närmare upplysningar erhålls genom
SVERIGES GEOLOGISKA UNDERSÖKNING
Box 670
751 28 UPPSALA
Telefon 018/15 52 80

ÅKE MÖLLER, PER ENGQVIST OCH
JAN-ERIK ANDERSSON

**HYDROGEOLOGISKA FÖRHÅLLANDEN INOM
ÖSTERGÖTLANDS SEDIMENTÄRA BERGGRUND
MED FEM PLANSCHER**

SKALA 1:100 000

HYDROGEOLOGICAL CONDITIONS WITHIN THE SEDIMENTARY
BEDROCK OF ÖSTERGÖTLAND
WITH FIVE PLATES
SCALE 1:100 000

UPPSALA 1981

ISBN 91-7158-237-1
ISSN 0346-7333

Textkartorna är ur sekretessynpunkt godkända för spridning.
Statens lantmäteriverk 1981-11-10.

INNEHÅLL

Abstract	5
1. Inledning	5
1.1. Undersökningens syfte och ändamål	5
1.2. Undersökningsområde	6
1.3. Undersökningsmetodik samt undersökningens omfattning	6
1.4. Tidigare undersökningar	7
1.5. Brunnsnummersystem	8
2. Geologi	8
2.1. Tektoniska huvuddrag	8
2.2. Berggrunden	10
2.2.1. Kristallina berggrunden	10
2.2.2. Sedimentära berggrunden	10
2.2.2.1. Kambrisk sandsten	10
2.2.2.2. Kambrisk lerskiffer och alunskiffer, ordovicisk alunskiffer	12
2.2.2.3. Ordovicisk kalksten, mägersten och skiffer	13
2.2.2.4. Silurisk lerskiffer	13
2.2.2.5. Visingsögruppen	13
2.2.2.6. Skollor	14
2.3. Jordarter	14
2.3.1. Allmänt	14
2.3.2. Morän	14
2.3.3. Isälvsavlagringar	15
2.3.4. Lera	15
3. Grundvatten	16
3.1. Allmänna hydrogeologiska förhållanden	16
3.2. Grundvatten i den kambriska sandstenen	17
3.2.1. Akvifertyp	17
3.2.2. Grundvattenbildning—infiltrationsförhållanden	17
3.2.3. Grundvattnets rörelsemönster	21
3.3. Hydrauliska parametrar	22
3.3.1. Inledning	22
3.3.2. Resultat och sammanfattning av provpumpningarna	24
3.3.3. Porositet och permeabilitet bestämda på borrhärnmaterial	26
3.3.4. Regional bestämning av permeabiliteten på basis av specifika kapaciteten	27
3.3.5. Sammanfattning av resultaten	28
3.4. Kapaciteten i bergborrade brunnar	29
3.5. Uttagsmöjligheter i sandstensakviferen	32
4. Grundvattnets fysikaliska egenskaper och kemiska sammansättning	35
4.1. Inledning	35
4.2. Vattenprovtagning	35
4.2.1. Vattenprovtagningens omfattning	35
4.2.2. Indelning av vattenanalyserna	36
4.2.3. Varifrån kommer det provtagna vattnet?	36
4.3. Några kemiska ämnens förekomst och uppträdande i grundvattnet	37
4.3.1. Allmänt	37
4.3.2. Järn och mangan	38
4.3.3. Kalcium och magnesium (totalhårdhet)	39

4.3.4. Fluorid	41
4.3.5. Klorid	42
4.3.6. Kväveföreningar	45
4.3.7. Gas	48
4.4. Grundvattnet i de olika akvifererna	49
4.4.1. Kalkstensakviferen	49
4.4.2. Skifferakviferen	49
4.4.3. Sandstensakviferen	50
4.4.4. Urbergsakviferen söder om området med sedimentära bergarter	58
4.4.5. Övriga akviferer	58
Appendix 1. Redogörelse för provpumpningarna	59
Diagram	76
Formelbilaga	88
Beteckningar	88
Appendix 2. Grundvattnets kemi	91
Litteratur	103

ABSTRACT

The occurrence and availability of groundwater in the Cambrian—Ordovician—Silurian sedimentary rocks within Östergötland county are presented. Some information is also given regarding the late Precambrian Visingsö sedimentary group of sandstone.

The report is mainly based on geological material from the petrological maps SGU Af 107, 119, 120, and from the Section of Well Records at the Geological Survey. A considerable amount of field work including measurement of the groundwater levels in selected wells, test drilling and pump tests, water sampling for chemical analyses etc. has also been done.

The main aquifer is the Cambrian sandstone. Due to its relatively small thickness, in general about 20 m, and low transmissivity, about $8 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$, well yield seldom exceeds 1.5 l/s. No particular pattern in regional variation of well yield has been found.

The piezometric level of the sandstone aquifer is generally very flat, indicating uniform recharge. The most obvious exception is the Fivelstad plateau, a large complex of Quaternary sand, gravel and till deposits, where a considerable local recharge probably takes place. It is unclear if similar conditions exist in other areas with sand and gravel deposits.

An attempt based on data from the pump tests has been made to calculate the available amount of groundwater from the sandstone aquifer. A rough estimation indicates that approximately 150 l/s or 13 000 m^3/d can safely be withdrawn. In the calculations, however, are not included areas where highly permeable Quaternary drift deposits directly overlay the sandstone aquifer and where exceptionally favourable conditions may exist due to a locally higher recharge.

1. Inledning

1.1. Undersökningens syfte och ändamål

Föreliggande arbete syftar till att översiktligt redogöra för grundvattenförhållandena inom Östergötlands sedimentära berggrund bortsett från några små områden med Visingsögruppen invid Vättern, som på grund av otillräcklig information ej kunnat behandlas mer ingående. Det har länge varit känt att denna berggrund varit en god leverantör av konsumtionsvatten, men mycket liten information finns om var eller hur detta grundvatten bildas, vart det rör sig, hur stora vattenmängder som borrhade brunnar normalt lämnar, eventuella olikheter i vattenkvalitet mellan olika bergarter eller områden o.d. Genom Sveriges geologiska undersöknings reguljära kartering av berggrund och jordarter inom Östergötland har sedan början av 1970-talet en mängd ny information om områdets geologi erhållits. En stor del av denna information kommer inte minst från den stora mängd brunnsborrningar som utförts de sista tjugofem åren. Med denna nya information som bas genomfördes inom SGU:s dåvarande brunnsarkiv och senare inom ramen för den hydrogeologiska karteringen somrarna 1974 och 1975 omfattande hydrogeologiska undersökningar, varvid bl.a. ovan nämnda pro-

blem studerades. Stor vikt har även fästs vid att klarlägga sambandet mellan grundvatten i de kvartära bildningarna och den underliggande berggrunden.

Jan-Erik Andersson svarar för en sammanfattning av provpumpningarna i kapitel 3.3 liksom för en utförligare genomgång av dem i appendix 1. Per Engqvist har författat kapitel 4 liksom appendix 2. För övriga delar svarar Åke Möller. Den sedimentära berggrundens utbredning och tektonik har utarbetats av Bertil Dahlman. Denne har dessutom bidragit med ett stort antal lagerföljdsdata genom sina mångåriga, direkta kontakter med brunnsborrharna. Det mesta av det kvartärgeologiska materialet, framför allt förekomsten och utbredningen av sand- och grusjordar, har erhållits från jordartskartorna Linköping NV, SGU Ae 24 (Johansson 1976), Linköping SV, SGU Ae 36 (Johansson 1979), Hjo NO, SGU Ae 22 (Johansson 1975) samt Linköping NO, SGU Ae 19 (Fromm 1976).

I fältarbetet har förutom författarna följande personer deltagit: Göran Andersson, Birgitta Båveryd, Gunnar Ekman, Polli Grubelich, Gunnar Hultqvist, Lennart Karlqvist, Lars Persson, Torbjörn Svensson, Hans Söderholm, Ulf Thoregren och Peter Wenster. Sven-Åke Heinemo har arbetat fram underlaget till kartan över grundvattnets kemiska sammansättning.

Jan De Geer har granskat manuskriptet och kompletterat det med ett flertal värdefulla uppgifter. Han har också bidragit med förbättringar av redaktionell karaktär.

1.2. Undersökningsområde

Den sedimentära berggrunden som omfattas av denna undersökning sträcker sig söderut från den öst—västliga förkastningsbranten mellan Vättern och Roxen till i stort sett en linje mellan Roxens sydvästra del via Skänninge och sjön Tåkerns södra delar fram till Omberg. Det undersökta området återfinns på de topografiska kartbladen Hjo 8 E NO och SO, Linköping 8 F NV, SV och NO.

1.3. Undersökningsmetodik samt undersökningens omfattning

Det huvudsakliga materialet, på vilket den hydrogeologiska undersökningen är baserad, utgörs av den information om lagerföljder, brunnskapaciteter etc. som erhållits vid genomgång av borrhprotokoll från drygt 500 borrhade brunnar eller muntliga uppgifter från jordbrukare, brunnsborrhare etc. Där de lämnade uppgifterna varit ofullständiga eller oklara har brunnarna där så varit möjligt undersökts av personal från SGU.

Områdets tredimensionella uppbyggnad redovisas genom sju profiler. Dessa profiler får inte betraktas annat än som principbilder av jord- och berglagrens

uppbyggnad längs varje profil. Lokala avvikelser förekommer med säkerhet, t.ex. inom området närmast söder om Boren och området mellan Tåkern och Vättern. Detta gäller inte minst det exakta läget och antalet av de angivna förkastningarna. Den viktigaste anledningen till denna osäkerhet i den geologiska bilden beror på lokalt glesa och ofullständiga brunnnsdata.

Den viktigaste vattenförande bergarten är den kambriska sandstenen. För att fastställa hur grundvattnet rör sig i denna har vattenytorna i ett stort antal sandstensbrunnar avvägts. Vattenytorna uppmättes i början av augusti 1975. Sandstensens permeabilitet och transmissivitet och i några fall även dess magasinskoefficient har bestämts genom provpumpningar i ett tiotal brunnar. Som jämförelse har vid SGU:s jordartslaboratorium även permeabiliteten och porositeten undersökts på ett antal borrhälsdata. Vidare har uppgifter om brunnarnas kapaciteter studerats och en översikt av dessa lämnas.

För att undersöka om samband föreligger mellan grundvattnet i jordlagren, framför allt sand- och gruslager, och grundvattnet i den underliggande berggrunden gjordes ett flertal specialundersökningar. Den stora isälvsavlagringen vid Fivelstad undersöktes i detta syfte mycket detaljerat genom bl.a. rördrivning, brunnborrning, provpumpning och inventering och avvägning av ett stort antal brunnar. Liknande men ej lika omfattande undersökningar gjordes på fem andra platser.

För att kartlägga den fysikalisk-kemiska kvaliteten på grundvattnet togs ett antal vattenprover sensommaren 1974. Framför allt analyserades grundvatten från sandstensbrunnar, men även ett mindre antal brunnar i andra bergarter undersöktes. Några prov för bakteriologisk undersökning togs ej. I samband med denna vattenprovtagning analyserades 46 prover på tritium för åldersbestämning. Dessa prover togs framför allt från sandstensbrunnar och avsikten med dem var bl.a. att belysa åldersfördelningen i grundvattnet och härigenom det översiktliga infiltrationsförloppet genom ovanliggande jord- eller bergarter. Ett mindre antal prover togs i samma syfte från brunnar i kalkstenen.

1.4. Tidigare undersökningar

Den tidigaste geologiska kartläggningen gjordes av SGU år 1882, då kartbladet Aa 83 "Vreta Kloster" utkom. Övriga blad som täcker det aktuella området utkom därefter fram till 1922, då bladet Aa 150 "Mjölby" utgavs. Den på dessa kartblad givna informationen är således relativt gammal och otillräcklig framför allt genom bristen på borrhålsdata.

Åren 1939 och 1943 utfördes ett antal kärnborrningar i SGU:s regi i avsikt att undersöka alunskifferns värde i bränslesammanhang. Borrningarna redovisas mycket detaljerat av A.H. Westergård i SGU:s serie C, nr 437, 1940 och nr 463, 1944.

SGU började en nykartering av delar av Östergötland i mitten av 1960-talet. Följande kartor är nu utgivna. Jordartskartor: Linköping NO, Ae 19, Linköping NV, Ae 24, Linköping SV, Ae 36 och Hjo NO, Ae 22. Berggrundskartor Linköping NO, Af 107, Linköping NV, Af 119, Linköping SV, Af 132 och Hjo NO, Af 120.

År 1951 publicerade P. Thorslund i Grundförbättring en översikt av grundvattenförhållandena i Östgötaslättens sedimentära berggrund. I översikten redogörs bl.a. för områdets grundläggande geologiska drag och sandstenslagrets betydelse för vattenförsörjningen framhålls.

Utöver P. Thorslunds uppsats tycks ingen mer omfattande hydrogeologisk undersökning eller sammanställning ha utförts. En viktig del av vår kunskap om grundvattensituationen kommer, som tidigare framhållits, från brunnsinventeringar och de ytterligare upplysningar som erhållits från brunnägare och brunnborrare.

1.5. Brunnsnummersystem

Läget av de inventerade eller på annat sätt dokumenterade brunnarna redovisas på Pl. 2. Brunnarna anges med ett löpande nummer inom varje topografiskt kartblad, t.ex. 8 F NV:1. Själva beteckningen för det topografiska kartbladet 8 F NV anges dock inte för varje brunn av utrymmesskäl.

Vid en del brunnar är löpnumret understruket. Dessa brunnar utgör borrhningar rapporterade till SGU:s brunnsarkiv efter 1976-01-01. Insamlade brunnsdata finns tillgängliga i SGU:s brunnsarkiv.

2. Geologi

I detta kapitel lämnas en översikt över områdets geologiska uppbyggnad med tyngdpunkten lagd på berg- och jordarternas betydelse från grundvattensynpunkt. För detaljinformation hänvisas till dels äldre geologiska kartblad i SGU Serie Aa, dels till nyligen publicerade eller under utgivning varande kartblad i SGU Serie Ae och Af.

På planscher 1 och 2 redovisas huvuddragen av områdets geologi.

2.1. Tektoniska huvuddrag

De sedimentära bergarterna är belägna i ett genom förkastningar i urberget nersänkt område. Den största förkastningen, som begränsar området mot norr, börjar ungefär 2 km söder om Lemunda vid Vättern och sträcker sig sedan åt öster

längs Borens norra strand och vidare längs Motala ströms norra sida fram till sjön Roxen. Höjdskillnaden vid förkastningen är störst i väster, där den kan bedömas vara ca 180—200 m. I närheten av Norrbysjön har förkastningen en språnghöjd av ca 100—120 m.

Närmast söder om denna förkastning är urbergets överyta i stort sett horisontell för att sedan stiga mot söder. En annan förkastning eller snarare en serie av nära varandra liggande förkastningar i öst—västlig riktning börjar ungefär tre till fyra kilometer sydväst om sjön Roxen och återfinns på ungefär samma avstånd söder om Boren. Berggrunden höjer sig där stegvis och förkastningarna utgör den södra begränsningen av det nersänkta berggrundspartiet. Söder om dessa förkastningar stiger urberget ytterligare, men mindre brant. Lokala mindre förkastningar förekommer även där, se Pl. 2.

Den kambrosiluriska berggrundens västra begränsning utgörs av en svagt bågformig linje från Ombergs nordspets till Kyttudden 2 km sydväst om gården N. Freberga på Motalavikens norra strand. Väster om denna linje vidtar en urbergsribba och därpå den stora Vätternsänkan med Visingsögruppens sedimentära bergarter.

Utöver nu nämnda större förkastningszoner förekommer med största sannolikhet ett flertal smärre förkastningar med i huvudsak nordvästlig och nordostlig riktning, speciellt inom området söder om det egentliga bäckenet. Även mindre öst—västliga förkastningar finns. Detta förhållande har påvisats genom det stora antal brunnsborrningar som under årens lopp har gjorts. Emellertid räcker inte materialet till att i verklig detalj klarlägga var alla dessa förkastningar går. På den hydrogeologiska översiktskartan redovisas därför endast de förkastningar vilkas lägen är relativt säkert bestämda. I övrigt hänvisas till profilerna, Pl. 2. Dessa profiler får anses som typprofiler och visar ej den i varje punkt helt exakta lagertjockleken eller läget av angivna förkastningar utan den principiella strukturen längs en ca 1 km bred profilzon.

2—4 km sydost om Vadstena uppträder en ringformad struktur i urberget — Granbystrukturen. Inom ringens centrala delar har borrats till 370 m djup utan att urberget påträffats. De äldsta lagren härstammar från underordovicium. Kännedomen om de hydrogeologiska förhållandena inom den inre cirkeln saknas.

Ett annat men mindre komplicerat urbergsparti (se Pl. 1) finns i sänkans östra del väster om Flistad.

2.2. Berggrunden

2.2.1. Kristallina berggrunden

Den kristallina berggrunden eller urberget såväl norr som söder om den av sedimentbergarter fyllda sänkan utgörs huvudsakligen av en oftast rödaktig, fin- eller medelkornig granit. Längs den norra förkastningszonen är urberget kraftigt förskiffrat eller krossat. Samma förhållande gäller troligen även längs övriga öst—västliga förkastningszoner. Vid kärnborrningar genom sedimentbergarterna ned i urberget har det konstaterats att detta är starkt vittrat till ett par meters djup.

2.2.2. Sedimentära berggrunden

De sedimentära bergarterna utom den s.k. Visingsögruppen bildades för mellan ca 570 och 400 miljoner år sedan under den kambriska, ordoviciska och delar av den siluriska perioden. Benämningen sedimentär berggrund beror på bergarternas bildningssätt. De utgörs bl.a. av eroderade äldre bergarter som genom transport, vanligen i vatten, avlagrats i vattendrag, sjöar eller hav och där genom olika processer hårdnat. Bergarterna i Östergötland avlagrades inte kontinuerligt under dessa långa tidsperioder, utan åtskilliga avbrott förekom. Sådana avbrott eller kraftiga skillnader i sedimentationsbetingelserna kännetecknas ibland av förekomsten av glaukonitlager, starkt grönaktiga avlagringar.

Sedimentbergarter förekom tidigare över stora delar av mellersta och södra Sverige, men har under tidernas lopp eroderats fullständigt utom inom områden där de skyddats genom bl.a. förkastningssänkor. Förkastningarna i Östergötland ägde således till största delen rum efter det att de sedimentära lagren avsattes. Dessa förkastningar och de rörelser som då skedde i berggrunden är orsaken till de ursprungligen horisontella lagrens nuvarande lutning och uppsprickning.

Den kambriska sandstenens utgående bildar i dag i söder en kraftigt undulerande zon, en till ett par kilometer bred, se Pl. 1. Norr om denna zon påträffas successivt de övriga sedimentära bergarterna, se Pl. 1. Skiffer från undersilurisk, dvs. tidig silurisk, tid förekommer ovan de ordoviciska bergarterna inom delar av området norr och nordväst om Motala. En geologisk—hydrogeologisk översikt av de olika bergarterna redovisas på fig. 1.

2.2.2.1. Kambrisk sandsten

Den kambriska sandstenen går endast i dagen vid några få lokaler längs Svartån

Fig. 1. Geologisk—hydrogeologisk översikt över Östergötlands sedimentära berggrund samt urberget närmast söder därom.
Relationship between stratigraphy and hydrogeology.

GEOLOGISK INDELNING		GEOLOGISK BESKRIVNING	MÅKTIGHET	GRUNDVATTNETS UPPTRÄDANDE	TRANSMISIVITET, m ² /s	PERMEA - BILITET, m/s	UTTAGBARA VATTENMÄNGDER
KVARTÄR		Morän, isälvsavlagringar, lera	Skiftande	Grundvatten kan lokalt utvinnas ur sand och grus	Skiftande	Skiftande	Varierande med de grundvattenförande jordlagrens sammansättning och mäktighet
SILUR		Lerskiffer med kalkiga skikt	Max. känd ca 65 m	I ev. sprickor	Ej känd	Ej känd	Förhållandena oklara p.g.a. för få brunnar
ÖVER-ORDOVICIUM		Kalk- och mägersten	20 - 22 m				
MELLAN-ORDOVICIUM		Skiffer	1 - 4 m	Dålig vattenföring	Se tab. 4	Se tab. 4	Grundvatten förekommer vanligen i kalkstensens övre del. Mediankapaciteten är ca 0.5 l/s. 2% lämnar mer än 2 l/s. Helt torra kalkstensbrunnar kan förekomma
		Kalksten med varierande halt av lera	10 - 13 m	I ev. sprickor			
		Bentonit (lera)	1 m	Svårgeomtränglig			
		Kalksten med nedåt starkt ökande lerhalt	25 - 26 m	I ev. sprickor. Tillgången varierar. Söder om bentonitgränsen är tillgången bättre			
UNDER-ORDOVICIUM		Kalksten, knölig	18 - 22 m	Normalt är alunskiffern relativt uppsprucken och kan lokalt vara vattenförande	Se tab. 4	Se tab. 4	Enstaka brunnar med kapacitet större än 1 l/s förekommer. Vanligen är dock kapaciteten avsevärt lägre
		Kalk- och lersten glaukonithaltig	0.2 - 1 m				
KAMBRIUM		Alunskiffer med orstensbankar	11 - 20 m	Ofta flera tryckytor. Akviferen den viktigaste i lager-serien	10 ⁻⁵ - 10 ⁻³	5·10 ⁻⁵ - 10 ⁻³	Kapaciteten är vanligen 0.5 - 1.5 l/s.
		Lerskiffer	13 - 18 m				
		Konglomerat övergående i glaukonithaltig sandsten	2 - 3 m				
PRE-KAMBRIUM		Sand- och mosten med starkt leriga skikt, främst i lager-seriens centrala delar	20 - 25 m	Grundvatten förekommer lokalt i begränsad omfattning i ev. sprickor	Skiftande	Skiftande Se tab. 1	Mycket varierande, kapacitet. Mediankapaciteten är 0.28 l/s
		Vittringszon, granit, lokalt gnejsgranit	—				

och Motala ström. Sandstenen har, inom områden som ej påverkats av erosion, vanligen en mäktighet mellan 20 och 24 m. Den vilar på en yta av vittrat urberg, normalt en rödaktig granit. Sandstenen indelas geologiskt sett i två olika delar, den undre Mickwitziasandstenen och den övre Lingulidsandstenen. Namnen kommer från fossil som är typiska för de olika lagren. Mickwitziasandstenen är en ej alltigenom homogen sandsten utan snarare en blandning av sand- och mosten med bitvis starkt lerhaltiga lager. Närmast över urbergsytan börjar den ofta med ett konglomerat på ett par decimeters tjocklek som sedan successivt övergår i en alltmer finkornig och ljus, kvartsrik sand-mosten. Bitvis är nederdelen av denna s.k. bottensandsten cementerad med karbonat, vilket medför starkt varierande vattengenomsläpplighet. Tjockleken på bottensandstenen varierar normalt mellan 3 och 5 m. Därefter följer den s.k. kråkstenen, en starkt lerhaltig sand-mosten där rena sand- eller mostensskikt av någon eller några centimeters tjocklek växellagrar med rena lerstensskikt av ungefär samma tjocklek. Färgen på kråkstenen är normalt svagt grönaktig på grund av glaukonitinslag. Den underliggande rena sand- eller mostenen är mer grå till gråvit. Tjockleken av kråkstenen är ca 12—15 m.

Med kråkstenen avslutas Mickwitzialagren och Lingulidsandstenen börjar. Denna har en tjocklek av 4—5 m och utgörs av en finkornig, ren sandsten, vilken genomsätts av tunna leriga skikt. Färgen är grå till gulvit. Emellertid kan färgen, speciellt inom områden där övriga sedimentära bergarter är eroderade, på grund av oxidation av i sandstenen ingående järnhaltiga mineral, vara rödaktig.

2.2.2.2. Kambrisk lerskiffer och alunskiffer, ordovicisk alunskiffer

Den kambriska sandstensformationen täcks vanligen av en starkt lerhaltig bergart, lerskiffer (lersten). Denna lerskiffer överlagras i sin tur av alunskiffer. Lerskiffern räknas till kambrium liksom de undre delarna av alunskiffern. Den sistnämnda övergår sedan bl.a. på grund av ändrat fossilinnehåll i ordovicisk alunskiffer.

Mellan det kambriska sandstenslagret och själva lerskiffern förekommer ett vanligen 2—3 m tjockt, starkt grönfärgat lager, det av brunnsborrhare kallade "grönberget". Den gröna färgen beror på den höga halten av glaukonit. Lagret består i de undre delarna av relativt grovkornig sandsten av någon eller några decimeters tjocklek och blir uppåt allt lerigare. Över "grönberget" vidtar den rena, grå hårda lerskiffern, vars mäktighet liksom alunskifferns tilltar från öster till väster. Inom områdets östra delar är lerskiffern ca 13—14 m och alunskiffern omkring 11 m, i väster är lerskiffern ca 18 m och alunskiffern 19—20 m.

Alunskiffern innehåller, speciellt i vissa horisonter lager med mörk oren kalksten, s.k. orsten. Dessa horisonter innehåller, liksom större delen av alunskiffer-

lagren, bituminösa ämnen. Oljehalten uppgår till i genomsnitt ca 4 %.

Tunna sandstensskikt kan förekomma i alunskifferns övre delar. Dessa skikt kan ibland vara grundvattenförande. I övrigt är varken ler- eller alunskiffern grundvattenförande annat än via eventuella sprickor.

2.2.2.3. Ordovicisk kalksten, mägersten och skiffer

Ovan alunskiffern följer en serie bergarter som domineras av kalksten men där ingår även skikt av skiffer och kalkhaltiga lerstenar. Kalkstenen börjar med ett mycket karakteristiskt skikt av gröngrå glaukonitrik ler-mosten av någon decimeters tjocklek följt av en ljus gröngrå glaukonithaltig kalksten av ca 0.4—1.0 m tjocklek. Detta glaukonithaltiga övergångslager mellan alunskiffern och kalkstenen kan dock ställvis saknas. I regel tilltar tjockleken från öster mot väster.

Ortocerkalkstenen följer sedan och har en tjocklek av ca 35—45 m. Färgen är i början på lagerserien gråaktig för att högre upp ofta bli brunröd. Över ortocerkalkstenen följer den s.k. chasmopskalkstenen som är 35—39 m mäktig. Denna kalksten skiljer sig från ortocerkalkstenen i det den är mer massiv och innehåller mindre ler- eller skifferinslag. Chasmopskalkstenen delas i sin övre del av ett vanligen metertjockt lager av grågrön bentonit, ursprungligen en vulkanisk aska som genom omvandling nu närmast kan betecknas som en lera. Ovan chasmopskalkstenen följer ett 3—4 m tjockt skikt av svart skiffer, s.k. tretaspisskiffer, vilken i sin tur överlagras av en gråvit kalksten-mägersten med en tjocklek av ca 20—22 m. Den överordoviciska kalkstenen-mägerstenen liksom tretaspisskiffern och de övre delarna av chasmopskalkstenen förekommer endast i sedimentbergartsområdetets norra delar.

2.2.2.4. Silurisk lerskiffer

Förkastningssänkans djupaste delar förekommer omkring Motala. Urbergsytan ligger där ca 240 m under Vätterns yta. På grund av det djupa läget har överst i lagerserien bevarats rester av en lerskiffer tillhörig den siluriska tiden. Den största tjocklek som påträffats vid borrhningar är för närvarande ca 65 m.

2.2.2.5. Visingsögruppen

I trakten av Lemunda, ca 10—12 km nordväst om Motala, förekommer en serie sedimentära bergarter, vanligen sandstenar, tillhörande den s.k. Visingsögruppen. Dessa bergarter är från sen prekambrisk tid, dvs. äldre än övriga sediment-

bergarter inom Östergötland. Bergarterna har bevarats genom bl.a. nedsänkningen i samband med uppkomsten av Vätternsänkan.

De bergarter som förekommer inom Lemundaområdet utgörs i huvudsak av ljusa sandstenar med hög halt av kvarts. Sandstenen är vanligen betydligt mer grovkornig än den kambriska sandstenen och är mycket lätt att skilja från denna. Mäktigheten på formationen inom området är okänd.

2.2.2.6. Skollor

I samband med landisens framryckande inom framför allt området närmast söder om Boren kom stora partier av kalkstenen att brytas loss av isen och transporteras söderut. Senare avlagrade jordarter har i de flesta fall effektivt dolt gränsen mellan dessa s.k. skollor och den underliggande berggrunden. Vid borrhningar genom skollorna kommer lagerföljden att bli helt avvikande från den väntade. Bland annat har sand och grus påträffats så att säga inlagrat i kalksten. Förhållandet beskrivs i detalj i beskrivningen till jordartskartan Linköping NV (Johansson 1976).

2.3. Jordarter

2.3.1. Allmänt

Jordlagrens största betydelse för grundvattenförhållandena i den underliggande berggrunden är att de kan verka skyddande mot infiltration av föroreningar, eller verka som infiltrations- eller nybildningsområden. Av denna anledning lämnas i det följande en kortfattad översikt över de vanligaste jordarterna, deras uppträdande och utbredning inom det område som omfattas av den sedimentära berggrunden.

2.3.2. Morän

Morän, vilken är den dominerande jordarten inom området, är vanligtvis avsatt direkt på berggrundsytan. Den har emellertid även påträffats som tunna skikt i och även underlagrande och överlagrande isälvsavlagringar. Mäktigheten varierar kraftigt. Att ange något meningsfullt medelvärde är därför inte möjligt. Mäktigheter på över 30 m förekommer (Johansson 1976).

Moränen har vanligen en mycket låg permeabilitet (vattengenomsläpplighet) och skyddar därigenom underliggande jord- eller bergarter från föroreningar. Brunnar i morän lämnar vanligen litet vatten.

2.3.3. Isälvsavlagringar

Isälvsavlagringar i form av sand—grusåsar, randbildningar o.d. utgör en betydande del av kartarealen framför allt i dess centrala och östra delar, (topografiska kartbladen Linköping NV och NO, se Pl. 1). Isälvsavlagringarna förekommer inom undersökningsområdet sällan som längre sammanhängande åssystem utan utgörs vanligen av lokala bildningar med en vanligen ganska komplicerad uppbyggnad och sammansättning. Avlagringarnas normala sträckning är vanligen i nord—sydlig riktning med talrika öst—västliga utbuktningar. Dessa senare beror på landisens ojämna avsmältningsförlopp, vilket förhållande även förklarar förekomsten av morän såväl i som på isälvsmaterial. Så har t.ex. i den stora sand—grusavlagringen öster om Fivelstad vid en provborrning utförd av SGU påträffats ett cirka en meter tjockt lager av morän i områdets centrala del. Vid en del andra provborrningar och brunnsborrningar inom samma område saknades dock detta lager. Utbredningen är således mycket varierande, vilket framgår av beskrivningen till jordartskartan Linköping NV (Johansson 1976, s. 57) i vilken framhålls att en stor del av bildningen har ett ytligt moräntäcke. Vid gården Ullstorp belägen 300—400 m öster om själva isälvsbildningen utgjordes jordlagren av ca 4 m morän följt av ca 17 m sand och grus. Grundvattenytan i en moränbrunn strax bredvid borrhålet stod ca 3.5 m under markytan medan vattenytan i själva borrhålet, som gick ned i sandstenen, befann sig ca 24 m under markytan (brunn 8 FNV 89). Förhållandet är en stark indikation på att isälvsavlagringen vid Fivelstad verkar som infiltrationsområde till den underliggande berggrunden. Förhållandet beskrivs i kapitel 3.

Under den stora isälvsavlagringen vid Lönsås påträffades vid borrning i botten på ett grustag ett par meter morän närmast berggrunden. Ett ytterligare belägg för den komplicerade lagerföljden i isälvsmaterial är förekomsten av två grundvattenytor vid en brunnsborrning i åskomplexet 2 km väster om Vallerstads kyrka. Här påträffades ett första grundvatten på 4.8 m djup under markytan. Efter ytterligare ett par meters borrning sjönk sedan grundvattenytan till 5.2 m, vilken nivå även gällde sedan borrningen nått ned i underliggande sandsten. Även där sker således en infiltration till sandstenen. De här redovisade förhållandens torde vara gällande för flertalet isälvsbildningar söder om Motala ström.

Den hydrogeologiska situationen inom och under de utbredda och mäktiga isälvsavlagringarna nordväst om Motala, framför allt inom den s.k. Djurkälla-platån, är mycket litet känd på grund av avsaknaden av tillräckligt djupa borrhål.

2.3.4. Lera

Stora arealer, speciellt inom slättområdet, upptas av glaciala finkorniga sedi-

ment, främst varvig lera. Övriga glaciala, finkorniga sediment, glacial grovlera, glacial mjåla och glacial finmo, utbreder sig över betydligt mindre områden men är spridda över praktiskt taget hela kartområdet (Johansson 1976).

Att lera skulle förekomma under isälvsavlagringar, dvs. mellan dessa och den underliggande berggrunden, är inte bekant.

Leran skyddar underliggande mer permeabla lager mot infiltration av t.ex. förorenat ytligt grundvatten samtidigt som nybildning av grundvatten, särskilt vid större lermåktigheter, förhindras.

3. Grundvatten

3.1. Allmänna hydrogeologiska förhållanden

Inom i stort sett hela det aktuella området påträffas vanligen två olika grundvattnetytor, en i jordlagren och en som är representativ för grundvattentrycket (representerad som vattennivån i en borrhållning) i underliggande berggrund. Inom områden med såväl kalksten, skiffer som sandsten kan det emellertid ibland förekomma upp till fyra olika grundvattnetytor (trycktytor), en representativ för jordlagren och en för varje bergart, ibland t.o.m. två i sandstenen. Vanligen är grundvattentytan i jordlagren den högst belägna och den i sandstenen den lägst belägna men talrika undantag förekommer. Bland annat har grundvattnets trycknivå i skifferkomplexet ibland varit lägre än trycknivån i sandstenen, ett förhållande som ej har kunnat nöjaktigt förklaras. I sandstenen påträffas som ovan nämnts ibland två trycknivåer varvid den högre nivån vanligen hänger samman med Lingulidsandstenen och den lägre med Mickwitziasandstenen. Förhållandet beror sannolikt på förekomsten av den mellanliggande lågpermeabla kråkstenen.

Är grundvattennivån i jordlagren och den närmast underliggande berggrunden lika sker ingen vertikal strömning. Detta förhållande tycks gälla för i stort sett hela kalkstensformationen söder om gränsen för det utgående bentonitlagret i övre delen av chasmopskalkstenen. Bentoniten utgör norr om gränsen ett effektivt tätande skikt för vertikal grundvattenströmning och inom detta område kan därför två grundvattnesystem uppträda i kalkstenen. I praktiken förefaller det dock vara så, att om inget vatten påträffas i kalkstenen över bentoniten är sannolikheten också liten att nämnvärda vattenmängder förekommer i kalkstenen under detta lager. Undantag förekommer dock och kan förklaras av förekomsten av större öppna sprickor eller spricksystem i den undre kalkstenen.

Den siluriska lerskiffern kan lokalt vara något vattenförande. Sedd i sin helhet lämnar dock denna formation obetydligt med vatten. Tyvärr lämnar även kalkstenen inom detta område mycket litet vatten. Detta beror främst på sämre infiltr-

rationsförhållanden genom närvaron av den överlagrande skiffern. Kapaciteten hos brunnar i den kambriska sandstenen inom samma område är föga känd då endast ett par brunnar har borrats ned till detta lager.

3.2. Grundvatten i den kambriska sandstenen

3.2.1. Akvifertyp

Den kambriska sandstenen är den viktigaste akviferen inom hela det sedimentära området. Hydrogeologiskt är den slutet (artesisisk) inom nästan hela sin utsträckning genom förekomsten av överlagrande jord- och bergarter med lägre permeabilitet. Den är öppen i stort sett endast där den direkt överlagras av sand- och grusjordar.

3.2.2. Grundvattenbildning — infiltrationsförhållanden

Nybildning av grundvatten till den kambriska sandstenen beror till stor del på fördelningen och sammansättningen av överlagrande jord- och bergarter. Där vattengenomsläppliga sand- och grusjordar direkt överlagrar sandstenen sker en relativt koncentrerad infiltration och grundvattenbildning. Inom områden med andra sedimentära bergarter eller lågpermeabla jordar (morän, lera) sker infiltrationen däremot väsentligt långsammare och är samtidigt jämnare fördelad över större ytor. Nybildningen av grundvatten bestäms där av dessa lagers kombinerade vertikala permeabilitet, mäktighet och skillnad i grundvattenytor (trycknivåer). Även förekomsten av sprickor i berggrunden spelar i detta sammanhang stor roll.

Ett av de viktigaste områdena för infiltration är Fivelstadsplatån. För att belysa situationen lämnas här en redogörelse över förhållandena.

Som framgår av Pl. 1 utbreder sig omedelbart öster om Fivelstads kyrka ett sammanhängande större område med isälvsmaterial. Området är topografiskt sett ett av de högst belägna inom Östgötaslätten. Samma förhållande gäller grundvattenytan, trycknivån, i sandstenen. Isälvsaterialet sträcker sig från Risberga vidare mot Skänninge, men är inom detta område till största delen överlagrat av grovmo och lera. Enligt Johansson 1976, s. 57, förekommer som tidigare nämnts ett ytligt moräntäcke över en stor del av Fivelstadsbildningen.

Fivelstadsplatån har en yta av ca 5 km². Jordlagrens mäktighet är vanligen 20—30 m i de centrala delarna och minskar gradvis mot periferin. Vid gården Ullstorp påträffades ca 17 m isälvsmaterial under 4 m morän. Av detta förhållande framgår att isälvsaterialets utbredning är betydande, framför allt åt öster. Allmänt kan sägas att de hydrogeologiska förhållandena, främst den höga

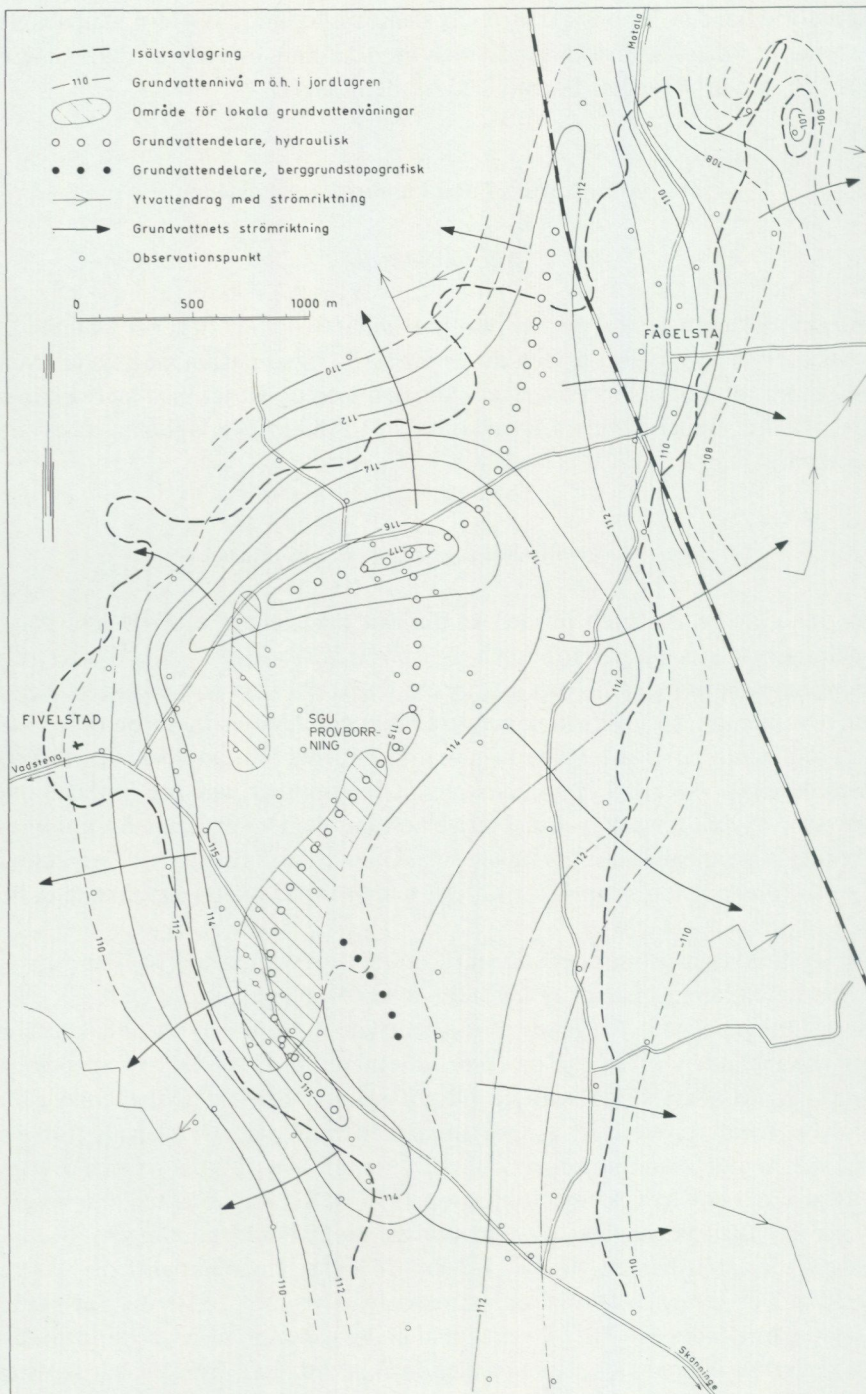


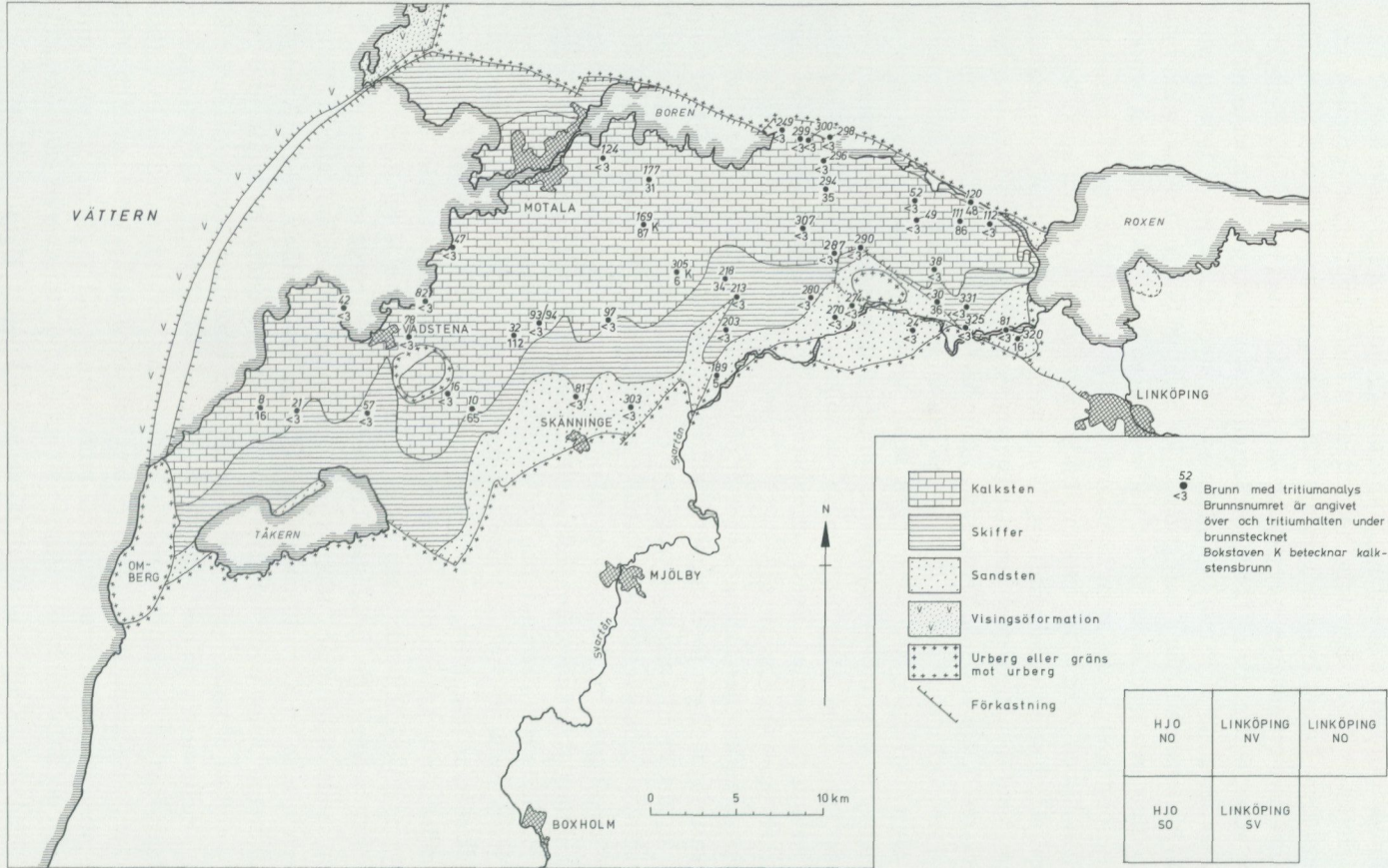
Fig. 2. Fivelstadsplatån.
The Fivelstad plateau.

grundvattennivån i sandstenen jämte områdets höga topografiska läge, indikerar att platån är ett av de viktigaste områdena för nybildning av grundvatten till sandstenen. Lokalt är grundvattenförhållandena emellertid mycket komplicerade och flera grundvattenytor (trycknivåer) förekommer oftast i såväl jordlagren som berggrunden. Beträffande jordlagren hänger detta samman med lokala inslag av lera, mo eller morän i själva isälvs materialet, se fig. 2. För att utreda grundvattensituationen i berggrunden lät SGU utföra en provborrning, brunn 27, genom hela lagerserien varvid vattenföringen bestämdes i samtliga bergarter. Lagerföljden utgjordes av ca 25 m sand och grus med ett metertjockt moränskikt mellan 23 och 24 m djup, därefter följde 16 m kalksten, 14 m alunskiffer, 19 m lerskiffer, 2 m glaukonitsandsten, 23 m sandsten följt av granit. Grundvattenytan i sand- och gruslagret samt kalkstenen stod på samma nivå, ca 16 m under markytan. Däremot stod trycknivån i alunskiffern och lerskiffern 32 m under markytan och i sandstenen 21 m under densamma. Förhållandet att trycknivån var lägst i skifferlagren beror troligen på att skiffern är förhållandevis tät på denna plats och att grundvattenytan inte hunnit ställa in sig. Provpumpningen visade att det var möjligt att utvinna 4—5 l/s ur kalkstenen, 0.1 l/s ur skifferlagren och 6—7 l/s ur sandstenen. Dessa vattenmängder är väsentligt högre än vad som är normalt inom Östgötaslätten.

En seismisk undersökning tvärs över platån i öst—västlig riktning visade att en förkastning troligen förekommer omedelbart väster om brunnen. Det är sannolikt att det är förkastningen som ger de ovanligt stora vattenmängderna. På grund av att grundvattennivån i sandstenen är lägre än i jordlagren — kalkstenen sker här vertikal strömning av grundvatten från de övre lagren ned i sandstenen (nybildning av grundvatten). Liknande infiltrationsförhållanden torde förekomma vid flertalet större sand- och grusförekomster inom södra delarna av slätten.

Ett spørsmål av stort intresse när det gäller nybildning av grundvatten till sandstenen är frågan om det sker någon transport av grundvatten från urbergsområdet norr och söder om sedimentbergartsområdet in mot detta. Av grundvattenytans nivåförhållanden framgår dock att så troligen ej är fallet. För att ytterligare belysa frågan har grundvattnets ålder bestämts genom att tritiumhalten i ett antal sandstensbrunnar undersökts. Åldern anges som tritiumenheter (TU). Är halten mindre än 3 är vattnet troligen äldre än ca 25—30 år. På fig. 3 redovisas resultatet av denna undersökning. Som väntat är tritiumhalten mindre än 3 i nästan samtliga brunnar, se speciellt området vid Borensberg och därifrån till Roxen. I de brunnar som har högre halter, t.ex. nr 294, 120 och 111, förklaras detta troligen med att foderröret i dessa brunnar endast når ned i överdelen av kalkstenen samt att tätningen mellan foderröret och berggrunden kan vara dålig. Ytligt och härigenom yngre grundvatten kommer denna väg in i brunnen och blandar sig med det äldre sandstensvattnet. Samma sak har konstaterats gälla för samtliga andra undersökta sandstensbrunnar med tritiumhalter större än tre.

Fig. 3. Tritiumhalten i urvalda brunnar.
The tritium content in selected wells.



För att belysa förhållandet i kalkstenen togs prover ur två brunnar, nr 8F NV 169 och 305. Dessa är relativt grunda brunnar som bara når ned i kalkstenen. Som väntat var halterna tritium här större än 3 TU, se fig. 3. Brunn 169 ligger dessutom mycket nära isälvs-material, vilket kan vara förklaringen till det ovanligt höga värdet. Brunn 305 ligger däremot under ren morän. Tritiumhalterna torde avspegla det typiska i infiltrationsförloppet.

Att numeriskt ange hur mycket grundvatten som infiltreras och omsätts inom hela eller delar av sedimentberggrunden låter sig knappast göra med någon större noggrannhet. Genom speciellt lokaliserade och utförda provpumpningar kan förhållandet dock lokalt bestämmas.

Att därefter extrapolera dessa så att de kan gälla för större områden är emellertid mycket vanskligt. Problemet behandlas separat i kapitlet om sandstens-akviferens totala potential.

3.2.3. Grundvattnets rörelsemönster

Grundvattenytan (trycknivån) i sandstensakviferen redovisas på Pl. 1 med 5 m ekvidistanslinjer. Det bör emellertid framhållas att ekvidistanslinjerna måste betraktas som mycket ungefärliga och mer indikerar den principiella strömbilden än den helt exakta nivån i varje enskild plats. Ekvidistanslinjerna tar ej hänsyn till mindre lokala avvikelser orsakade av uttag i brunnar, t.ex. är grundvattenytan i trakten av Varv påverkad av uttag, se profil 4, Pl. 2.

Grundvattenytan når högst vid Fivelstadplatån och vid urbergsutgåendet vid Appuna. Grundvattnet rör sig från dessa höjdområden i stort sett åt väster mot Vättern från en linje mellan Appuna, Orlunda, Fivelstadsplatån och vidare norr-ut mot Motalaviken, medan allt grundvatten öster om denna linje rör sig mot Roxen. Svartån och dess fortsättning åt väster, Skenaån, tar emot en stor del av detta grundvatten. Det kan dock inte uteslutas att en del av strömningen även är riktad mot Boren. Dräneringen tycks där vara koncentrerad till vissa delar av åarna där jordlagren som täcker sandstenen är mycket tunna eller saknas. Sådana platser är i närheten av Lindevads säteri, till en del längs nederdelen av Storbäcken, vid Svartån nordväst om Björkeberg och vid Mjölörp och Mjölörpesjön samt längs fallsträckan vid Krokbränninge väster om Kaga kyrka.

Inom området öster om vattendelaren, mellan Fivelstad och Motalaviken och norr om det område som dräneras av Svartån eller med denna anslutna vattendrag, rör sig grundvattnet på bred front mot Roxen. En viss dränering torde ske längs fallsträckan mellan Boren och Norrbysjön och mellan Ljungsjön och Kungsbro. Större delen av grundvattnet läcker troligen ut i Roxen. Inom området väster om vattendelaren mellan Fivelstad och Motalaviken rör sig grundvattnet åt väster. Något entydigt dräneringsområde eller betydelsefulla källor har e:

påträffats utan grundvattnet kommer troligen fram som källor i Vättern.

Ett område av betydelse för grundvattnets rörelsemönster är den stora förkastningen som sträcker sig från Linköping åt nordväst via Mjölorp, Flistad och fram mot Klockrike, se Pl. 1. Av grundvattenytorna i sandstensbrunnar mellan Mjölorp och Flistad förefaller det som om en viss dränering sker längs förkastningszonen mot sydost. Ett borrhål (provbrunn) utfördes strax väster om Mjölorp i förkastningszonen och det var möjligt att pumpa med 2—3 l/s. Förhållandet indikerar relativt god vattengenomsläpplighet. Någon synlig källa kunde emellertid inte påträffas längs Svartån inom det område där förkastningen passerar. Troligen sker utläckningen under Svartåns vattenyta. Någon större regional betydelse för grundvattenflödet har förmodligen inte förkastningen.

Den genomgående mycket flacka lutningen på grundvattenytan inom stora delar av sedimentberggrunden tyder på en mycket låg omsättning och en begränsad nybildning av grundvatten.

3.3. Hydrauliska parametrar

Av

JAN-ERIK ANDERSSON

3.3.1. Inledning

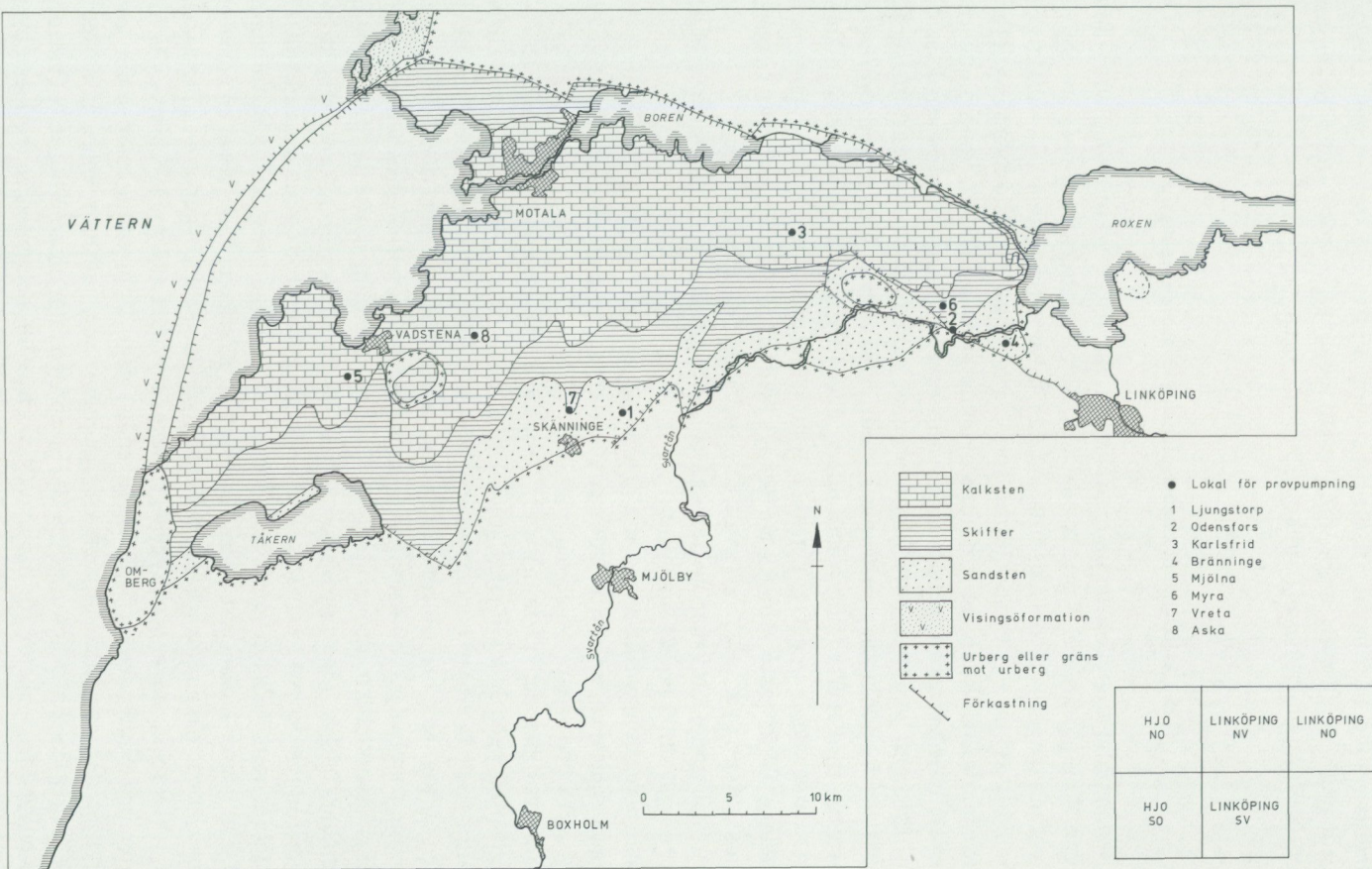
I detta kapitel redovisas sandstensakviferens hydrogeologiska parametrar, framför allt transmissivitet och permeabilitet samt magasinskoefficient. Materialet är baserat på de uppgifter om kapacitet och avsänkning som gått att erhålla från befintliga brunnar samt från åtta provpumpningar i borrhål utförda i SGU:s regi 1974 och 1975, se vidare kapitel 3.3.2 samt appendix 1.

Vid utvärdering av provpumpningsresultaten har ett flertal olika metoder använts och resultaten jämförts. Stor vikt har lagts vid dessa arbeten och de redovisas därför ingående då liknande arbeten tidigare inte utförts inom Östergötlands sedimentära berggrund. Beräkningsmetoderna redovisas men ej den teoretiska bakgrunden; för denna hänvisas till litteraturförteckningen och det examensarbete som utförts på detta material (Andersson 1976).

Genom den kambriska sandstens stratigrafiska läge kan denna normalt betraktas som en sluten akvifer med läckage. Detta gäller även i sådana områden där sandstenen enbart täcks av jordlager av typen morän, moränlera eller lera. Det underliggande urberget kan på ett visst djup betraktas som impermeabelt.

Då man vid provpumpningar bestämmer permeabilitet och effektiv porositet eller magasinskoefficient på en relativt stor berg- eller jordartsvolym kommer inverkan av eventuella sprickor eller spricksystem att automatiskt ”inbakas” i de

Fig. 4. Läge av provpumpade brunnar.
Location of pump-tested wells.



erhållna resultaten. För att försöka få en uppfattning om sprickornas inverkan gjordes permeabilitets- och porositetsbestämningar på en borrhärna från Borensberg. Resultaten redovisas i kapitel 3.3.3.

3.3.2. Resultat och sammanfattning av provpumpningarna

Provpumpningar med varierande varaktighet har utförts på totalt 8 platser inom undersökningsområdet. Läget av de undersökta platserna framgår av fig. 4. Provpumpningarna är dels utförda som långtidsprovpumpningar — varaktighet två till tre veckor —, dels som korttidsprovpumpningar — varaktighet några timmar eller dagar. Vidare har tre stegprovpumpningar gjorts. Provpumpningarna har företrädesvis utförts genom grundvattennivåmätningar i den pumpade brunnen, eftersom lämpliga observationsbrunnar saknades på de flesta platserna. Flertalet provpumpningar utfördes i sandstensakviferen som ibland överlagras av enbart jordlager, vanligen moränlera, eller i övriga fall av skiffer och kalksten. Sandstenen kan därför betraktas som en sluten akvifer. Vid provpumpning av denna akvifer sker vanligen ett läckage från ovanliggande jord- eller bergart. Denna typ av hydrauliskt system kallas en läckande sluten akvifer.

Provpumpningarna har utvärderats enligt olika metoder. Vid utvärderingen måste man skilja på två huvudfall:

1. när bergarten är relativt isotrop och homogen och
2. när bergarten är anisotrop antingen på grund av sprickor eller inhomogeniteter i själva bergarten.

Ett antal metoder tillämpbara för dessa olika fall beskrivs i appendix 1.

Utvärderingen har i första hand skett med konventionella metoder (Theis-Waltons och Jacobs metoder), se t.ex. Walton (1970). Dessa förutsätter att akviferen är homogen och isotrop. Så är dock inte alltid fallet med de aktuella bergarterna, som i några fall har visat tecken på betydande sprickighet. Olika modeller har utvecklats för denna situation. Genom förenklingar av i naturen rådande förhållanden kan man uppskatta akviferens hydrauliska egenskaper. En sådan modell utgör den s.k. kanalmodellen, där grundvattenströmningen i huvudsak betraktas som endimensionell (Gustafson 1978). Denna situation kan föreligga vid åsakviferer liksom vid andra långsträckta akviferer, t.ex. längs en förkastningszon när denna har väsentligt bättre hydrauliska egenskaper än omgivande berg. Vidare har använts en speciell sprickakvifermodell som utvecklats av Gringarten och Witherspoon (1972). Slutligen har några approximativa metoder som utnyttjar den specifika kapaciteten i pumpbrunnen använts enligt bl.a. Jetel (1967) och Haman och Ambo (1973). Stegprovpumpningarna har dels utvärderats enligt Jacobs metod för brunnar (Walton 1970), dels enligt en teori som bygger på minsta kvadratanpassning (Labadie & Helweg 1975).

Hydrauliska parametrar, som transmissivitet och permeabilitet samt magasin-koefficient och läckagekoefficient, har beräknats för olika bergartsled, främst sandstenen. Med hjälp av stegprov-pumpningar har brunnarnas hydrauliska egenskaper bestämts. Eftersom observationsbrunnar saknades vid de flesta av provpumpningsplatserna, har inte några tillförlitliga värden på magasin-koefficienten och läckagekoefficienten varit möjliga att erhålla. Vissa approximativa bestämningar av dessa parametrar har dock gjorts på några av platserna.

Resultaten av provpumpningarna har sammanfattats i tabell 1. Medelvärden för vissa hydrauliska parametrar beräknade på olika platser har angetts i denna tabell.

Genom jämförelse av resultaten från olika utvärderingsmetoder och typer av provpumpningar har transmissiviteten för en relativt homogen och sprickfri sandsten inom undersökningsområdet bestämts till $1-3 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ samt permeabiliteten till $5 \cdot 10^{-7} - 4 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$ (lokalerna Karlsfrid och Vreta). På platser där sandstenen mottar tillskott av grundvatten främst från överlagrande jordarter och/eller från den översta delen av urberget har transmissiviteten för denna sammansatta akvifer bestämts till $2-4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ och permeabiliteten till ca $2 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ (lokalerna Ljungstorp och Myra). Några tillförlitliga värden på magasin-koefficienten och läckagekoefficienten har ej kunnat erhållas i något av dessa fall, se tabell 1.

Vid några lokaler har konstaterats att sprickor genomsätter pumpbrunnen. Detta medför att man får väsentligt annorlunda värden på de hydrauliska parametrarna. Vid Bränninge har transmissiviteten bestämts till ca $2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ och magasin-koefficienten till $6 \cdot 10^{-4}$ (permeabiliteten ej bestämd). Vid denna lokal har dock konstaterats att ett relativt stort direkt grundvattentillskott sker från ovanliggande jordlager, vilket innebär att dessa värden representerar en sammansatt akvifer bestående av uppsprucken sandsten plus jordlager. Vid Mjölna har sandstenens transmissivitet bestämts till ca $2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ och permeabiliteten till ca $1 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$. För en sammansatt sprickakvifer i en förkastningszon, omfattande hela den sedimentära berggrunden, har transmissiviteten bestämts till ca $9 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ och medelpermeabiliteten till ca $2 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$ (lokalen Odensfors). En approximativ beräkning av magasin-koefficienten ger ca $4 \cdot 10^{-4}$ och av läckagekoefficienten P'/m' ger ca $2 \cdot 10^{-9} \text{ s}^{-1}$ i detta fall, se tabell 1.

Beträffande kalkstenen och skiffern är endast ett fåtal värden tillgängliga. Vid en relativt homogen och sprickfri bergart har transmissiviteten för kalksten bestämts till $4-9 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ och permeabiliteten till $1-7 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$ (lokalerna Karlsfrid och Mjölna). Vid mera uppsprucken berggrund kan transmissiviteten för kalkstenen uppgå till ca $6 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ (lokalen Aska). För alunskiffer och lerskiffer tillsammans är endast ett enda värde tillgängligt (lokalen Karlsfrid). Detta visar att transmissiviteten är ca $4 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ och permeabiliteten ca $1 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$ vid denna lokal, se tabell 1.

TABELL 1. Sammanställning av beräknade medelvärden för hydrauliska parametrar ur provpumpningar vid olika platser inom Östergötlands sedimentära berggrund.
Calculated mean values of hydraulic parameters from pumping tests at different localities within the sedimentary bedrock of Östergötland.

Parameter	Varaktighet av provpumpning	Kapacitet $Q \cdot 10^{-3}$ (m^3/s)	Avsänkning s_w (m)	Transmissivitet T (m^2/s)	Permeabilitet K (m/s)	Magasins-koefficient S	Läckage-koefficient $P'/m \cdot (s^{-1})$	Akvifer/ Bergart	Måktighet (m)
Ljungstorp	14 dygn	1.0	7.71	$2.0 \cdot 10^{-4}$	$2.0 \cdot 10^{-5}$	-	-	sandsten	10
Odensfors	14 dygn	1.0	6.76	$8.5 \cdot 10^{-4}$	$1.5 \cdot 10^{-6}$	$4.4 \cdot 10^{-4}$	$2.4 \cdot 10^{-9}$	kst+sk+sst	23
Karlsfrid	6 timmar	0.07	41	$3.7 \cdot 10^{-6}$	$1.0 \cdot 10^{-7}$	-	-	kalksten	39
Karlsfrid	-	-	-	$3.9 \cdot 10^{-6}$	$1.4 \cdot 10^{-7}$	-	(antaget)	skiffer	28
Karlsfrid	14 dygn	0.20	20.6	$1.3 \cdot 10^{-5}$	$5.1 \cdot 10^{-7}$	-	-	sandsten	26
Bränninge	3 dygn	3.4	2.18	$2.0 \cdot 10^{-3}$	-	$5.7 \cdot 10^{-4}$	$3.1 \cdot 10^{-8}$	sandsten	16
Mjölna	0.5 timmar	0.12	19	$9.0 \cdot 10^{-6}$	$6.6 \cdot 10^{-7}$	-	-	kalksten	14
Mjölna	7.5 timmar	2.6	8.95	$2.0 \cdot 10^{-4}$	$1.1 \cdot 10^{-5}$	-	-	sandsten	18
Myra	3 x 1 timme	0.47-1.0	1.49	$4.3 \cdot 10^{-4}$	$2.0 \cdot 10^{-5}$	-	-	sandsten	22
Vreta	3 x 1 timme	0.13-0.55	9.79	$2.9 \cdot 10^{-5}$	$4.1 \cdot 10^{-6}$	-	-	sandsten	7
Aska	3 x 1 timme	0.52-1.25	3.80	$6.3 \cdot 10^{-4}$	-	-	-	kalksten	17

En utförlig beskrivning och utvärdering av samtliga provpumpningar återfinns i appendix 1. Provpumpningsanalyserna redovisas grafiskt i diagrammen 1—22.

3.3.3. Porositet och permeabilitet bestämda på borrhärnmaterial

För att undersöka de sedimentära bergarternas sammansättning och måktighet utfördes i kalkbrottet omedelbart söder om Borensbergs samhälle en kärnboring. Borrningen nådde till 63.8 m djup och lagerföljden var följande:

Djup (m)

0—4	Kalksten
4—24	Alunskiffer
24—38.5	Lerskiffer
38.5—40.5	Glaukonit-fosforitsandsten
40.5—63.8	Sandsten
> 63.8	Urberg

För bestämning av permeabilitet och såväl total som effektiv porositet för sandstenen togs 4 prover. Prov 1 togs på nivån 60 m i den s.k. bottensandstenen. Sandstenen var ljusgrå och kornstorleken mellansandig till grovsandig. Proverna 2 och 3 togs på 46.9 m och 46.0 m djup, dvs. i övre delen av Mickwitziasandstenen. Sandstenen utgörs här av en finsandig sandsten (grovmosten). Prov 4 togs

på 39.5 m djup i glaukonit-fosforitlagret ("grönberget"). Resultaten av bestämningarna framgår av tabell 2. Försök har även gjorts att bestämma den effektiva porositeten men med hänsyn till svårigheterna att få tillförlitliga värden på den effektiva porositeten har dessa tyvärr måst utgå.

TABELL 2. Bestämning av sandstenens totalporositet och permeabilitet.
Determination of total porosity and permeability of the sandstone.

Prov nr	Nivå (m u. m.y.)	Total porositet %	Permeabilitet (m/s)
1	60.0	14.3	$3.2 \cdot 10^{-9}$
2	46.9	16.6	$1.1 \cdot 10^{-6}$
3	46.0	18.0	$0.7 \cdot 10^{-6}$
4	39.5	7.7	$6.9 \cdot 10^{-9}$

Värdena av den totala porositeten förefaller rimliga. Ett större lerinnehåll i prov 4 (glaukonit-fosforitlagret) kan förklara det lägre värdet här.

Vad gäller permeabiliteten är det låga värdet för prov 1 sannolikt beroende på en utfällning av kalkcement (kalцит) mellan kornen liksom det högre lerinnehållet kan förklara det låga värdet för prov 4. Proverna 2 och 3 är de mest rättvisande med hänsyn till vad som framgått av övriga bestämningsmetoder (se tabell 4).

En jämförelse mellan permeabilitetsvärdena från proverna 2 och 3 med det genomsnittsvärde på permeabiliteten som beräknats enligt specifika kapacitetsdata för 82 brunnar, visar att denna senare metod ger ett medianvärde för sandstenens permeabilitet som är 3—4 gånger större än de förstnämnda provernas (2 och 3). Förklaringen hänger sannolikt samman med att sprickigheten slår igenom i det större regionala materialet.

3.3.4. Regional bestämning av permeabiliteten på basis av specifika kapaciteten

För att göra en uppskattning av permeabilitetens variation inom Östergötlands kambrosilurområde har Z-parametern (Jetel 1967) beräknats för ett antal brunnar inom området, dels för kalkstensbrunnar, dels för sandstensbrunnar. Som jämförelse har medtagits brunnar som borrats i urberg. Parametern Z kan relateras till permeabiliteten och definieras enligt formel (7), se formelbilagan s. 88. Sambandet mellan Z-parametern och permeabiliteten framgår av formel (8). Beräkningarna har gjorts på basis av brunnsborrningsfirmors uppgifter om kapaci-

tet och avsänkning samt lagerföljd för olika brunnar. Z-värdesberäkningarna sammanfattas i tabell 3 och resultaten återges på normalfördelningspapper i diagram 23 s. 87. Av tabellen och diagrammet framgår att sandstenen har den högsta permeabiliteten och urberget den klart lägsta. Kalkstensens permeabilitet blir sannolikt något överskattad inom området, beroende på att kalkstensbrunnar med god kapacitet är överrepresenterade i materialet, eftersom borrhningen normalt fortsätts till den underliggande sandstenen om kapaciteten är liten i kalkstenen. Detta innebär att för få kalkstensbrunnar med liten kapacitet sannolikt kommer med i statistiken.

TABELL 3. Sammanställning av regional bestämning av permeabiliteten utgående från Z-parametern enligt Jetel's metod.
Regional determination of permeability based on the Z-parameter according to Jetel's method.

Bergart	Antal brunnar	Variationsområde för Z	Medianvärde för Z	Permeabilitet (m/s) $R/r_w = 10^4$
Kalksten	60	1.49 — 5.04	3.27	$2.7 \cdot 10^{-6}$
Sandsten	82	2.60 — 5.39	3.43	$3.9 \cdot 10^{-6}$
Urberg	40	0.48 — 4.50	2.27	$2.7 \cdot 10^{-7}$

Av tabell 3 och diagram 23 framgår att spridningen av Z-värdena är klart större för kalkstens- och urbergsbrunnar än för sandstensbrunnar. Detta tyder på att lokal sprickighet är av avgörande betydelse för de förstnämnda bergarternas hydrauliska egenskaper.

För området karakteristiska medelvärden på permeabiliteten för de olika bergarterna fås om man utgår från medianvärdena för Z enligt tabell 3. Det befintliga materialet är dock för litet för att man skall kunna dra några säkra slutsatser om regionala variationer av permeabiliteten inom området.

Utöver de medianvärden på permeabiliteten som framgår av tabell 3 har även de undre och övre kvartilsvärdena, dvs. de permeabilitetsvärden som motsvarar 25% resp. 75% i diagram 23, framräknats för sandsten och kalksten. Med dessa värden kan permeabilitetsintervallet för sandsten anges till $2-9 \cdot 10^{-6}$ m/s och för kalksten till $8 \cdot 10^{-7} - 9 \cdot 10^{-6}$ m/s.

3.3.5. Sammanfattning av resultaten

Sammanfattning av resultaten från de olika bestämningsmetoderna redovisas i nedanstående tabell (tabell 4).

TABELL 4. Sammanställning av hydrauliska parametrar från olika bestämningsmetoder.
Compilation of hydraulic parameters from different methods of determination.

Metod	Provpumpning		Regional metod	Lab.-bestämning borrkärnor	
	T (m ² /s)	K (m/s)		K ₂₅ -K ₇₅ (m/s)	Nivå (m u. m.y.)
SANDSTEN					
a. Relativt homogen och sprickfri	1—3·10 ⁻⁵	5·10 ⁻⁷ — 4·10 ⁻⁶	↑	39.5	6.9 · 10 ⁻⁹
b. Sprickig	2·10 ⁻⁴	1·10 ⁻⁵		46.0	0.7 · 10 ⁻⁶
c. Sprickfri + jordlager	2—4·10 ⁻⁴	2·10 ⁻⁵	2—9·10 ⁻⁶	46.9	1.1 · 10 ⁻⁶
d. Sprickig + jordlager	2·10 ⁻³	—	↓	60.0	3.2 · 10 ⁻⁹
e. Sandsten + skiffer och kalksten	9·10 ⁻⁴	2·10 ⁻⁶		—	—
KALKSTEN					
a. Relativt homogen och sprickfri	4—9·10 ⁻⁶	1—7·10 ⁻⁷	8·10 ⁻⁷ — 9·10 ⁻⁶	—	—
b. Sprickig	6·10 ⁻⁴	—	↓	—	—
SKIFFER					
Alunskiffer + lerskiffer	4·10 ⁻⁶	1·10 ⁻⁷	—	—	—

3.4. Kapaciteten i bergborrade brunnar

På fig. 5 redovisas den procentuella fördelningen av kapaciteten i brunnar i sandsten, kalksten och urberg. Diagrammen baserar sig på samtliga inventerade brunnar från vilka kapacitetsuppgifter erhållits. Då uppgifter om grundvattenytans avsänkning i många fall saknas kan diagrammen bara användas för att belysa förhållandena mycket översiktligt. På diagrammen har kapacitetsintervallet 0.5 l/s använts (heldragen linje), men även intervallet 0.2 l/s (streckad linje). Beträffande sandstensbrunnar har bara brunnar medtagits vilka penetrerar hela eller större delen av sandstenslagret.

Av diagrammet över kapacitetens fördelning vid sandstensbrunnar framgår att det mest frekventa intervallet (28%) ligger mellan 1.0 och 1.5 l/s. Medianvärdet är 1.4 l/s. Andelen brunnar med kapaciteten större än 2 l/s är endast ca 20%. Beträffande kalkstensbrunnar hade ca 4% lägre kapacitet än 0.5 l/s och bara drygt 1% lämnade mer än 2 l/s. För urberget gäller att ca 44% lämnade mindre än 0.2 l/s och t.ex. blott 3% mer än 2 l/s.

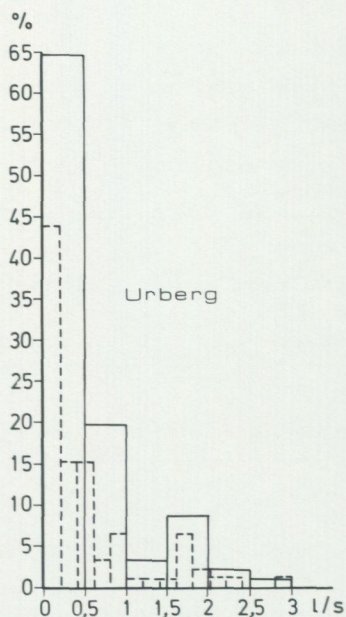
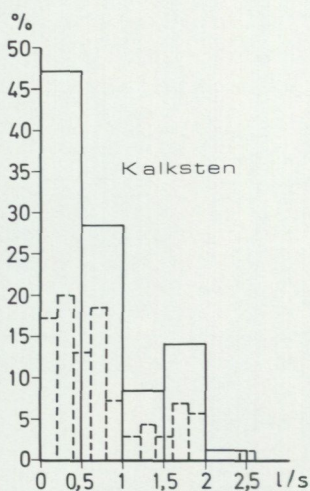
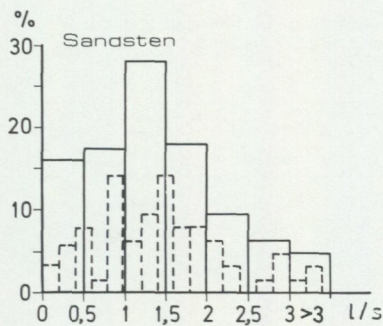


Fig. 5. Kapacitetens fördelning i bergborrade brunnar.
The distribution of the capacity of rockdrilled wells.

På fig. 6 har kapaciteten i brunnar satts i relation till mäktigheten av de genomborrade, vattenförande berglagren. Jordlagren och de delar av berglagren som befinner sig ovan grundvattenytan är alltså ej inräknade. Brunnarna har indelats i a, kalkstensbrunnar, b, brunnar genom hela lagerföljden, c, brunnar med skiffer och sandsten, d, sandstensbrunnar samt e, urbergsbrunnar. På de olika diagrammen har för varje vattenförande mäktighetsintervall angivits antalet brunnar för vilka kapaciteten bestämts.

På diagrammet gällande kalkstensbrunnar, grupp a, framgår att de flesta får sitt vatten vid mindre än 20 m borrhjup vattenförande kalksten, och att en större

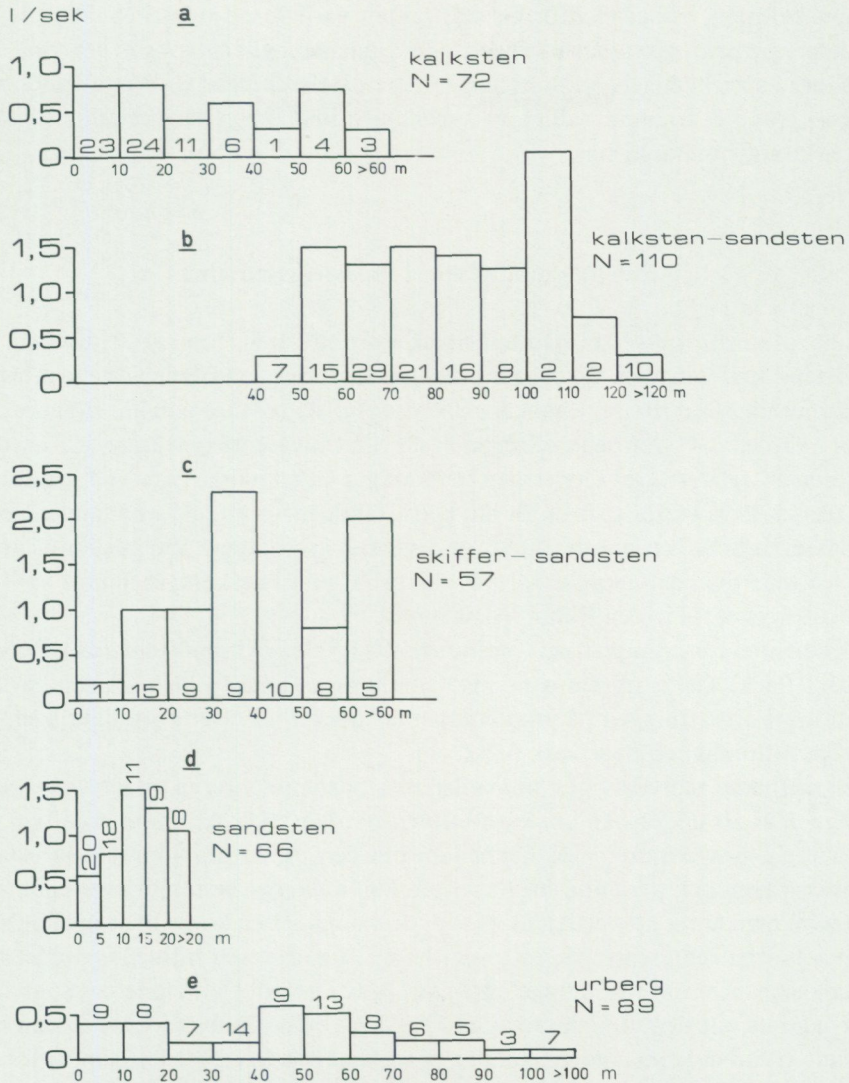


Fig. 6. Brunnskapaciteten i relation till mäktigheten av olika bergarter.
The well capacity in relation to the thickness of different rock units.

mäktighet sällan ger mer vatten. För brunnar genom hela lagerserien, grupp b, är kapaciteten i allmänhet nästan oberoende av den vattenförande mäktigheten. Förhållandet förklaras med att det mesta grundvattnet kommer från sandstenen. För brunnar genom skiffer och sandsten, grupp c, varierar den aktuella kapaciteten med den vattenförande mäktigheten. Detta beror troligen på att då skiffren utgör den översta bergarten har den blivit mer uppsprucken än om den överlag-

ras av kalksten, vilket medför en större men varierande kapacitet. Sandstensbrunnar, grupp d, visar ganska varierande kapaciteter vilket troligen beror på variationer i sprickigheten och inhomogeniteter i själva bergarten. Beträffande urberget, grupp e, framgår tydligt att kapaciteten inte kan sättas i relation till den vattenförande mäktigheten.

3.5. Uttagsmöjligheter i sandstensakviferen

Det är av stort intresse att veta hur mycket grundvatten som går att utvinna ur sandstensakviferen dels per brunn, dels totalt inom sandstenens hela utbredningsområde. Den första frågan är relativt enkel att besvara och har tidigare berörts i kapitel 3.4. Den senare frågan är emellertid väsentligt svårare att besvara och endast relativt grova överslagsberäkningar har kunnat göras på grund av bristen på säkra basdata, framför allt beträffande infiltrationsförhållandena och dessas eventuella variationer inom undersökningsområdet. Vid beräkningarna har transmissiviteten antagits vara $8 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, magasinskoefficienten $S = 10^{-5}$ och läckagekoefficienten $P'/m' = 10^{-9} \cdot \text{s}^{-1}$.

Gradienten för grundvattnets piezometriska trycknivå i sandstenen är generell relativt flack. Detta tillsammans med sandstenens relativt låga transmissivitet medför att omsättningen på grundvattnet är mycket låg. Detta framgår även av de låga tritiumhalterna, se kap. 3.2.2.

En metod att teoretiskt bestämma den ur sandstensakviferen uttagbara vattenmängden är att undersöka hur stort influensområde en enskild brunn har vid ett visst uttag, och därefter med kännedom om den totala utbredningen av sandstensakviferen och det antal brunnar som kan anläggas bestämma vattenmängden. Om man antar att vertikalt läckage förekommer och att de hydrogeologiska förhållandena representerade på kurva 1 i fig. 7 gäller, blir influensområdet för en sandstensbrunn vid ett antaget uttag av 1 l/s ca 3 km². Detta innebär, som tidigare nämnts, att den uttagbara vattenmängden i detta fall balanseras av den nybildade grundvattenmängden inom det påverkade området. Med undantag för de områden inom vilka speciellt gynnsamma infiltrationsförhållanden råder, t.ex. Fivelstadsplatån och för urbergsområdena vid Flistad och Granby samt den del av kalkberggrunden som ligger innanför gränsen av det mellanordoviciska bentonitlagret (se Pl. 1), fås en resterande yta av sandstensakviferen på ca 460 km². Antalet möjliga brunnar blir då ca 150 st och den hypotetiskt uttagbara vattenmängden enligt samma förutsättningar som gäller för kurva 1 i fig. 7 blir 150 l/s eller 13.000 m³/d. Detta motsvaras av en medelinfiltration av ca 10 mm per år.

En ytterligare vattenmängd bör kunna erhållas från de med sand och grus överlagrade områdena, bl.a. Fivelstad och Skänninge. Det finns för närvarande dock ej tillräckligt underlag för att kunna beräkna hur mycket grundvatten som

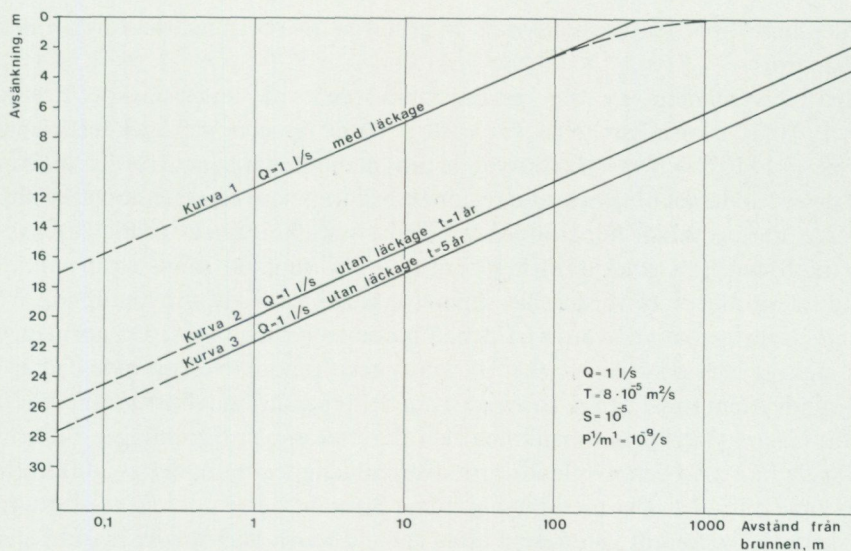


Fig. 7. Grundvattenytans (den piezometriska trycknivåns) teoretiska utbredning runt en sandstensbrunn.
The theoretical distribution of the piezometric head around a well in the sandstone aquifer.

skulle kunna utvinnas inom dessa avsnitt. En försiktig överslagberäkning visar att ett totalt uttag av ca 50 l/s eller 4 300 m³/d borde vara möjligt. Det skulle krävas mera omfattande undersökningar med ytterligare provpumpningar för att det skulle bli möjligt att mera exakt bestämma de uttagbara grundvattenmängderna inom olika delar av sandstensakviferen.

Ett lämpligt sätt att undersöka hur permeabiliteten hos ett vattenförande lager varierar inom olika områden, oberoende av brunnsdjup och det vattenförande lagrets mäktighet, är att studera den specifika kapaciteten per meter vattenförande berglager. Om t.ex. en brunn är borrarad 5 m ned i den kambriska sandstenen och är försedd med foderrör från sandstenens överyta upp till markytan samt kapaciteten är 1 l/s och avsänkningen i brunnen är 2 m blir den specifika kapaciteten per meter akvifer 0.1 l/s · m². Kan man öka avsänkningen med t.ex. ytterligare 2 m (om grundvattenytans nivå i brunnen gör detta möjligt) bör kapaciteten bli 2 gånger större dvs. 2 l/s. Denna hydrogeologiska parameter som kan relateras till permeabiliteten har beräknats för sandstens- och kalkstensbrunnar inom Östgötaslätten, Pl. 4. Den mycket jämna spec. kapaciteten per meter akvifer hos sandstensbrunnar liksom det mer varierande värdet för kalkstensbrunnar är uppenbar. Beträffande kalkstenen är förekomsten av lokala spricksystem av avgörande betydelse. Det måste i detta sammanhang emellertid nämnas att kartbilden inte är helt komplett då speciellt inom kalkstensområdet många brunnar med

mycket liten kapacitet inte redovisats på grund av att borrningarna fortsatt ned i sandstenen.

Med användande av de genomsnittsvärden på magasinskoefficienten ($S = 1 \cdot 10^{-5}$), transmissiviteten ($T = 8 \cdot 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$) och läckagekoefficienten ($P'/m' = 1 \cdot 10^{-9} \text{s}^{-1}$), som erhållits vid de provpumpningar som utförts i samband med denna undersökning och som regionalt bedömts som representativa, se kapitel 3.3.2, har beräknats hur stor den teoretiska avsänkning av grundvattenytan (den piezometriska tryckytan) i genomsnitt blir runt en sandstensbrunn. På grund av att alltför få värden har kunnat erhållas på S vid provpumpningarna har ett "representativt" värde på denna parameter måst antas. Då normalt ett visst läckage eller perkolations sker till sandstenen genom överlagrande bergarter vid grundvattenuttag i denna kan man även beräkna när jämviktstillstånd bör inträffa. Någon ytterligare avsänkning sker därefter ej och tillrinningen till brunnen är då lika med den nybildade grundvattenmängden inom det av sänktratten påverkade området. Det mest ogynnsamma läget inträffar om ingen infiltration alls sker och därför allt vatten som uttas ur sandstenen tas från det i sandstens porer och sprickor magasinerade vattnet. På fig. 7 redovisas hur stor denna teoretiska avsänkning blir på olika avstånd från en brunn vid ett antaget uttag ur denna av 1 l/s. Jämvikt bör teoretiskt sett inträffa — med ovan nämnda representativa hydrauliska parametrar — efter 1 dygns kontinuerlig pumpning. Av kurva 1 framgår att avsänkning blir ca 11 m på 1 m avstånd från brunnen och ca 2.5 m på 100 m avstånd. Vid 1 000 m avstånd uppgår avsänkning teoretiskt till 4 cm. Sker däremot ingen infiltration alls fortsätter avsänkning. Denna framgår av kurvorna 2 och 3 efter 1 resp. 5 års kontinuerlig pumpning. Det är dock högst osannolikt att så stora avsänkningar som dessa sker i verkligheten, eftersom en viss infiltration (och därmed nybildning av grundvatten) nästan alltid torde äga rum. Det bör i detta sammanhang tilläggas att avsänkning i själva brunnen vid ovan redovisade exempel kan bli större än vad som framgår av kurvorna. Detta beror på de ändrade strömningsförhållanden som uppstår när vattnet strömmar in i brunnen från den omgivande akviferen. Förhållandet belyses i kapitlet om stegprov-pumpningarna (appendix 1). Med hjälp av kurvorna kan man även t.ex. beräkna hur nära varandra brunnar kan placeras utan att den inbördes påverkan blir för stor. Om vi antar att en brunn är belägen 100 m från en uttagsbrunn blir påverkan på den första brunnen ca 2.5 m vid en kontinuerlig pumpning med 1 l/s i uttagsbrunnen.

4. Grundvattnets fysikaliska egenskaper och kemiska sammansättning

AV
PER ENGQVIST

4.1. Inledning

Vid bedömning av ett områdes eller en avlagrings grundvattentillgångar är det även nödvändigt att känna till vattnets fysikaliska och kemiska sammansättning. Ofta brukar dock grundvatten till skillnad från ytvatten kunna användas utan föregående rening. Ibland behövs emellertid rening av vattnet. Då rening av vatten alltid innebär kostnader och ökade risker för driftstörningar bör strävan vid projektering av vattentäkter vara att söka finna ett så bra råvatten som möjligt. Ingående kännedom om grundvattnets kvalitet innebär oftast att felaktig planering kan undvikas i de fall där vattnets sammansättning är av betydelse ur hygienisk eller teknisk synpunkt.

4.2. Vattenprovtagning

4.2.1. Vattenprovtagningens omfattning

För att visa grundvattnets sammansättning och egenskaper inom Östergötlands sedimentära berggrund av kambrosilurisk ålder och inom Visingsösandstenen samt angränsande urberg togs sommaren 1974 omkring 600 vattenprover. Prover togs uteslutande i bergboreade brunnar. På samtliga prover bestämdes i fält specifik ledningsförmåga, pH-värde samt fluoridhalt. Fullständig fysikalisk-kemisk analys har utförts på cirka 245 prover av AB Hydroconsult-Kemibyårn, Bromma. De flesta av de sistnämnda analyserna finns redovisade på Pl. 5. På denna anger cirkelns storlek den specifika ledningsförmågan i $\mu\text{S}/\text{cm}$. Ledningsförmågan är i stort sätt proportionell mot vattnets totala jonkoncentration. Cirkelns mittpunkter visar provtagningsplatsernas lägen om inte någon annan markering finns. Fördelningen av de viktigaste jonerna (Ca, Mg, Na, K, Cl, SO_4 , HCO_3 och NO_3) i milliekvivalentprocent åskådliggörs med olika stora cirkelsektorer. Vid reproduktionen har mycket låga koncentrationer inte kunnat återgivas.

Uppgifter om brunnnummer i SGU:s brunnarkiv, brunnarnas djup och de genomborrade lagerföljdernas översta och understa lager återfinns också på Pl. 5. Uppgifter om koncentrationerna av järn (Fe) och fluorid (F) i grundvattnet redovisas på fig. 8 och fig. 11.

4.2.2. Indelning av vattenanalyserna

Analyserna har indelats på så sätt att de bergarter som genomborrats vid brunns anläggning fått utgöra grunden för indelningen. Tabell 5 visar antalet analyser inom de olika grupperna. Översta talet i varje spalt visar antalet analyser från brunnar som endast borrhats genom ett bergartslager. Talet därunder visar antalet brunnar som borrhats igenom två lager och så vidare. I beskrivningen och på Pl. 5 anges endast det översta och understa lagret medan mellanliggande lager utelämnats. Står det t.ex. kalksten—urberg (KS—UB) avses därmed en brunn som borrhats genom såväl kalksten, skiffer som sandsten och att borrhningen avslutats i urberget. Brunn nr 8FNV:163 har borrhats genom såväl kalksten som sandsten (KS-SS). På Pl. 5 saknas markering för sandsten.

TABELL 5. Antalet vattenanalyser från olika typer av brunnar.

Distribution of water analyses from different types of wells.

Kalksten	(KS)	31			
Skiffer	(SK)	12	3		
Sandsten	(SS)	56	30	21	
Urberg	(UB)	15	10	21	27
Silurisk kalksten och skiffer		5			
Visingsögruppen		2			
Saltvattenbrunnar		6			
Avhärdat vatten		6			

Brunnar med kloridhalter över 300 mg/l Cl behandlas i en särskild grupp utan hänsyn till omgivande berggrund. Dessa brunnar brukar något oegentligt kallas salta brunnar därför att man vid denna koncentration kan börja känna en viss saltsmak. Bräckt vatten är egentligen en mer adekvat beteckning men av tradition brukar brunnar med koncentrationer över 300 mg/Cl kallas salta i Sverige. Brunnar borrhade i Visingsösandsten och i siluriska skifferar och kalkstenar bildar egna grupper. I några fall har prov tagits på vatten som passerat avhärtningsaggregat, se tabell 24 analys nr 25. Även dessa har förts till en särskild grupp.

4.2.3. Varifrån kommer det provtagna vattnet?

När man tar ett vattenprov i en icke fodrad brunn får man i regel ett blandprov av de olika akviferernas vatten om den är borrhad genom flera olika vattenförande lager t.ex. kalksten, skiffer och sandsten. Provet kommer att bestå av vatten från såväl kalkstenen, skiffern som sandstenen i olika proportioner beroende på

de rådande hydrauliska förhållandena. I detta sammanhang måste man även ta hänsyn till eventuella vattentillskott från jordlagren. Genom att fodra brunnarna med rör kan man hindra vatten från överlagrande jord- och berglager att tränga in. När det gäller sandstensbrunnar brukar man i regel avsluta rördrivningen några meter ned i sandstenen. För att kunna utestänga allt icke önskvärt vatten måste tätningen mellan röret och berget vara effektiv. Det kan ofta vara svårt att kontrollera om så är fallet.

Att brunnen i den nedre delen är tät är dock ingen garanti för att vatten ej kan tränga in från annat håll. I bl.a. Östergötland har det nämligen varit vanligt att borra en ny brunn i botten på en äldre grävd brunn. Genom att borra i botten på en sådan brunn har man sluppit ifrån en del borr- och rördrivningskostnader och man har också i stor utsträckning kunnat utnyttja tidigare utförda installationer. Man har även i en del fall kunnat tillgodogöra sig vatten från den grävda brunnen. Ofta har vattnet i den grävda brunnen emellertid varit av sämre kvalitet. Detta har ibland medfört att vattnet i den nya brunnen blivit förorenat av det ytliga grundvattnet. I de brunnar som görs idag söker man att förhindra inströmning av ytligt grundvatten från jordlagren genom att även täta brunnarnas övre delar. När man studerar analysresultaten från olika vattenprover som tagits ur brunnar som borrats genom flera olika lager, måste man vara uppmärksam på att det i vissa fall kan vara fråga om blandvatten, om man inte med visshet vet att vattnet kommer från en brunn med effektiv tätning.

4.3. Några kemiska ämnens förekomst och uppträdande i grundvattnet

4.3.1. Allmänt

Av olika skäl varierar grundvattnets sammansättning och egenskaper både regionalt och mot djupet. För att kunna bedöma om ett vatten är dåligt eller bra måste man ha tillgång till allmänt accepterade kvalitetsnormer (gränsvärden). I Sverige gäller de värden som finns återgivna i appendix 2, tabell 21.

Grundvattnets kemi är beroende av en rad kemiska processer som griper in i varandra på ett svåröverskådligt sätt. I appendix 2 har några av dessa förlopp beskrivits.

Då man pumpar upp grundvatten sker oftast vissa förändringar av kvaliteten. Det beror bland annat på att trycket förändras samt att vattnet kommer i kontakt med syre och koldioxid i luften.

Ovanstående medför problem vid kemiska jämviktsberäkningar. Därför måste provtagning ske under grundvattenytan. Härför krävs särskild utrustning och gott om tid.

4.3.2. Järn och mangan

Järn- och manganhalterna i grundvattnet är beroende av vattnets redoxpotential och pH-värde. Förekomsten av speciella bakterier påverkar även dessa ämnens uppträdande. I naturliga vatten är det praktiskt taget alltid tillgången eller avsaknaden av löst syre som bestämmer oxidations-reduktionsjämvikten. När det finns löst syre är jämvikterna förskjutna mot det oxiderande tillståndet. pH-värdet kontrolleras huvudsakligen av koldioxid—bikarbonat—karbonatbuffertsystemet. Detta har till följd att grundvattnet i det här aktuella området kommer att ha högre pH-värden och lägre bikarbonathalter mot djupet.

Resultaten från undersökningarna i Östergötland visar att när pH-värdet överskrider 8 så har grundvattnet så låga järnhalter att det inte behöver utgöra något problem för förbrukarna. Brunnarna med de högsta järnhalterna har pH-värden under 7.5. Här skall tilläggas att ytterst få brunnar har pH-värden under 7.0. Den procentuella fördelningen av brunnar med järnhalter över respektive under 0.4 mg/l Fe i de olika akvifererna redovisas i fig. 8. Som framgår av diagrammet är den procentuellt sett största andelen brunnar med höga järnhalter belägna i de översta akvifererna. Brunnarna med låga järnhalter finner man företrädesvis i de djupt belägna akvifererna.

Ur hälsosynpunkt har de höga järnhalterna knappast någon betydelse men höga järnhalter kan ge vattnet en mindre angenäm smak.

Manganhalterna i grundvattnet inom området är genomgående mycket låga. Av 225 undersökta brunnar har 7% halter mellan 0.1 och 0.2 mg/l Mn. Över 0.2 mg/l Mn har endast cirka 3% av brunnarna. Övriga brunnar har halter under 0.1 mg/l Mn. Vatten med höga manganhalter påträffas sällan i brunnar borrhade genom kalksten—sandsten och kalksten—skiffer. Olägenheterna med för höga

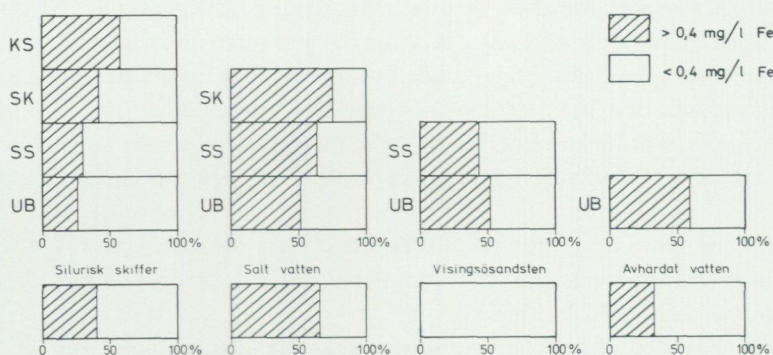


Fig. 8. Procentuella fördelningen av brunnar med järnhalter över resp. under 0.4 mg/l Fe i relation till omgivande berggrund. Förkortningar, se fig. 17.
Percentage distribution of wells with iron contents above respectively below 0.4 mg/l Fe in relation to the surrounding bedrock. Abbreviations, see Fig. 17.

manganhalter är i stort sett desamma som för järn. Det kan dock vara svårare att ta bort mangan än järn ur vattnet.

4.3.3. Kalcium och magnesium (totalhårdhet)

Höga halter av kalcium och magnesium gör vattnet hårt. Hårt vatten orsakar högre tvålförbrukning genom att kalktvål bildas och vid uppvärmning faller kalciumkarbonat ut, vilket kan skapa olägenheter genom avsättningar i vattenvärmare, pannor, disk- och tvättmaskiner, kaffebryggare och dylikt. Totalhårdheten anges numera som summan av halterna av kalcium och magnesium, sistnämnda ämne omräknat till motsvarande halt kalcium. Tidigare användes ofta tyska hårdhetsgrader. Tyska hårdhetsgrader erhålls genom att multiplicera totalhårdheten uttryckt i kalcium med 0.14.

Den procentuella fördelningen av brunnar med vatten med olika grad av hårdhet inom de skilda bergarterna framgår av fig. 9 och av kartan i fig. 10. "Mycket hårt vatten", det vill säga vatten med en totalhårdhet som ligger över 150 mg/l Ca, förekommer mest i brunnar borrade i det kalkstensfattiga urberget omedelbart söder om sandstensområdet. Även bland de brunnar som enbart borrar genom sandsten finns det många med "mycket hårt vatten". Såväl urbergs- som sandstensbrunnarna är belägna söder om kalkstensens utbredningsområde. I brunnar borrade enbart i kalksten är vattnet däremot ytterst sällan "mycket hårt" utan i allmänhet endast "hårt", det vill säga att totalhårdheten ligger mellan 70 och 150 mg/l Ca. Det kan förefalla egendomligt att så många brunnar i urberget har så hårt vatten då man vet att urberget inte innehåller särskilt mycket kalk.

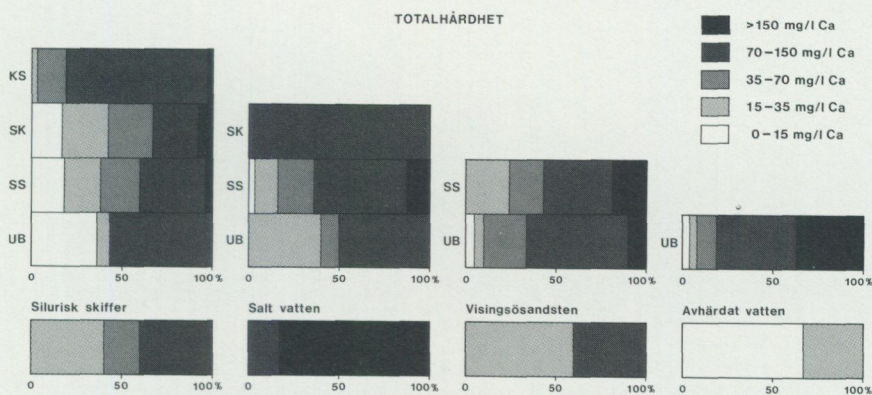
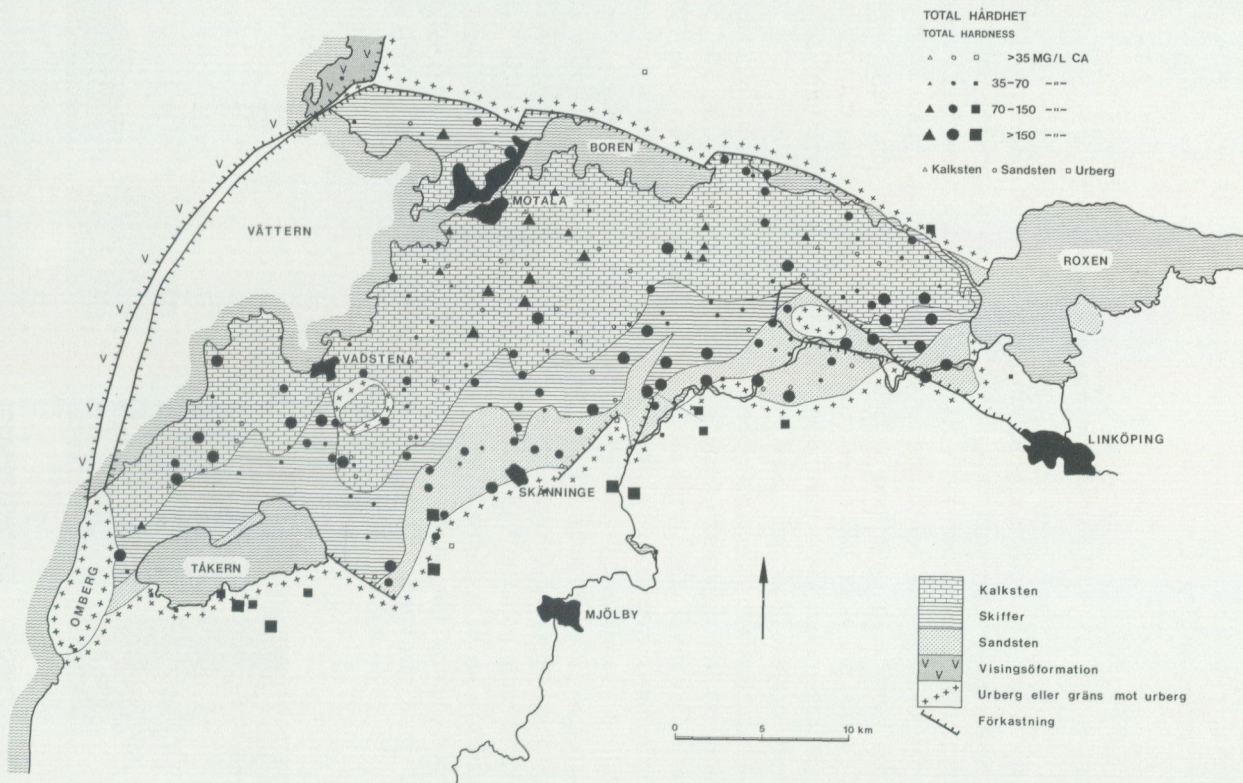


Fig. 9 Procentuella fördelningen av brunnar med olika totalhårdhet i relation till omgivande berggrund. Förkortningar, se fig. 17.
 Percentage distribution of wells with different total hardness in relation to the surrounding bedrock. Abbreviations, see Fig. 17.

Fig. 10. Karta över totalhårdhet i brunnar från olika akviferer.
 Map showing total hardness in wells sunk in different aquifers.



I detta fall är det inte i första hand berggrundens sammansättning som avgör vattnets hårdhet utan de överlagrande jordarterna. Framför allt moränen är viktig i detta sammanhang. När landisen drog fram över kalkstensberggrunden bröts berget upp och isen transporterade det kalkrika materialet söderut. Den senaste isrörelseriktningen i området var från N 15°V. De uppbrutna bergartsfragmenten krossades och maldes ned till mindre partiklar. Det finmalda kalkstensrika materialet avlagrades efter hand som morän ovanpå urberget söder om sedimentberggrunden. Det nedkrossade materialet i moränen uppvisar stor kontaktyta gentemot det nedsipprande grundvattnet. Ett förhållande som i hög grad gynnar kalkupplösningen. Genom att vattnets strömningshastighet i morän är relativt långsam så erhålls den nödvändiga kontakttid som fordras för att processen skall hinna gå till jämvikt. I kalkberggrunden där vattnet strömmar snabbt i sprickor med små kontaktytor blir vattnet inte så hårt trots att berget består av kalk.

I en s.k. geotravers över Östergötlands kambrosilurområdet har Melkerud (1977) visat att kalkstenshalten i moränen visar en förskjutning av den maximala halten kalksten i moränen till 3 — 4 km söder om kalkstensbergets utgående. Moränen som vilar ovanpå kalkstenen innehåller i stor utsträckning urbergmaterial utan större inslag av kalksten. Så är åtminstone förhållandena i de övre delarna av moränen i norr. De ur vittringssynpunkt aktiva delarna av moränen innehåller sålunda mycket liten kalk. Detta är säkert också en bidragande orsak till att vattnet i kalkstenen ej är hårdare än vad som är fallet.

När grundvattnet passerar zoner med glaukonit eller vissa lermineral blir det mjukt genom jonbyte. Jonbytet innebär i detta fallet framför allt att grundvattnets innehåll av kalcium byts ut mot natrium. Detta för med sig att brunnar borrade genom kalksten ned i underliggande skiffer har varierande hårdhet från "mycket mjukt" till "mycket hårt vatten". Brunnar borrade djupare får vatten som antingen är mjukt eller hårt. Brunnar som når ända ned till urberget får "mycket mjukt" eller "hårt vatten". Frånsett några brunnar med "mjukt vatten" saknas vatten med andra totalhårdheter helt i sistnämnda typ av brunnar. Sammanfattningsvis kan sägas att chansen att finna vatten som är "mycket mjukt" ökar med djupet inom kalkstens- och skifferområdena och att "hårt vatten" är dominerande inom sedimentområdet i söder. Det hårdaste vattnet påträffas i urbergsbrunnar söder om sedimentområdet.

4.3.4. Fluorid

Grundvattnets fluoridinnehåll är av intresse från hygienisk synpunkt eftersom fluorid tillförd i lämplig mängd har en klart visad kariesförebyggande effekt. Dessutom är fluorid i mycket små mängder nödvändigt för normala livsfunktion-

ner. Fluorid kan även ha negativa inverknings på människokroppen.

För stora intag av fluor medför att emaljfluoros och osteofluoros kan uppträda. Emaljfluoros visar sig i form av vita och i svårare fall bruna fläckar på tänderna. Den kan endast uppkomma under tandkronornas mineraliseringstid det vill säga främst i åldern 0 — 6 år. Modersmjölk innehåller mycket litet fluorid. Däremot kan den modersmjölksersättning som man ger till spädbarn innehålla olika höga halter av fluorid beroende på hur mycket fluorid det finns i det vatten som man använder vid tillagningen. För att undvika eller mildra risken för emaljfluoros bör man använda fluoridfattigt vatten för beredning av modersmjölksersättning och välling. I socialstyrelsens kungörelse om användning av fluorider i kariesförebyggande syfte, SOSFS (M) 1977:26, ges information om olika slag av begränsningar i fluoridintaget för de fall dricksvattnet innehåller upp till 1.5 mg/l och mellan 1.5 och 4 mg/l och för halter över 4 mg/l F. Som otjänligt till konsumtionsvattnet bedöms halter över 6 mg/l F. Osteofluoros kan uppträda vid livslång användning av dricksvatten med höga fluoridhalter, det vill säga mer än 6 mg/l F. Osteofluoros yttrar sig i form av förändringar i benvävnaderna som kan orsaka ryggesthet och dylikt.

En fluoridhalt av 1 — 1.2 mg/l F anses idealisk i vårt klimat och med våra konsumtionsvanor. Kariesprofylaktisk effekt får man redan vid en fluoridhalt av minst 0.7 — 0.8 mg/l F. Vid lägre halter rekommenderar socialstyrelsen att man tillför fluorid för att önskat skydd mot karies skall erhållas.

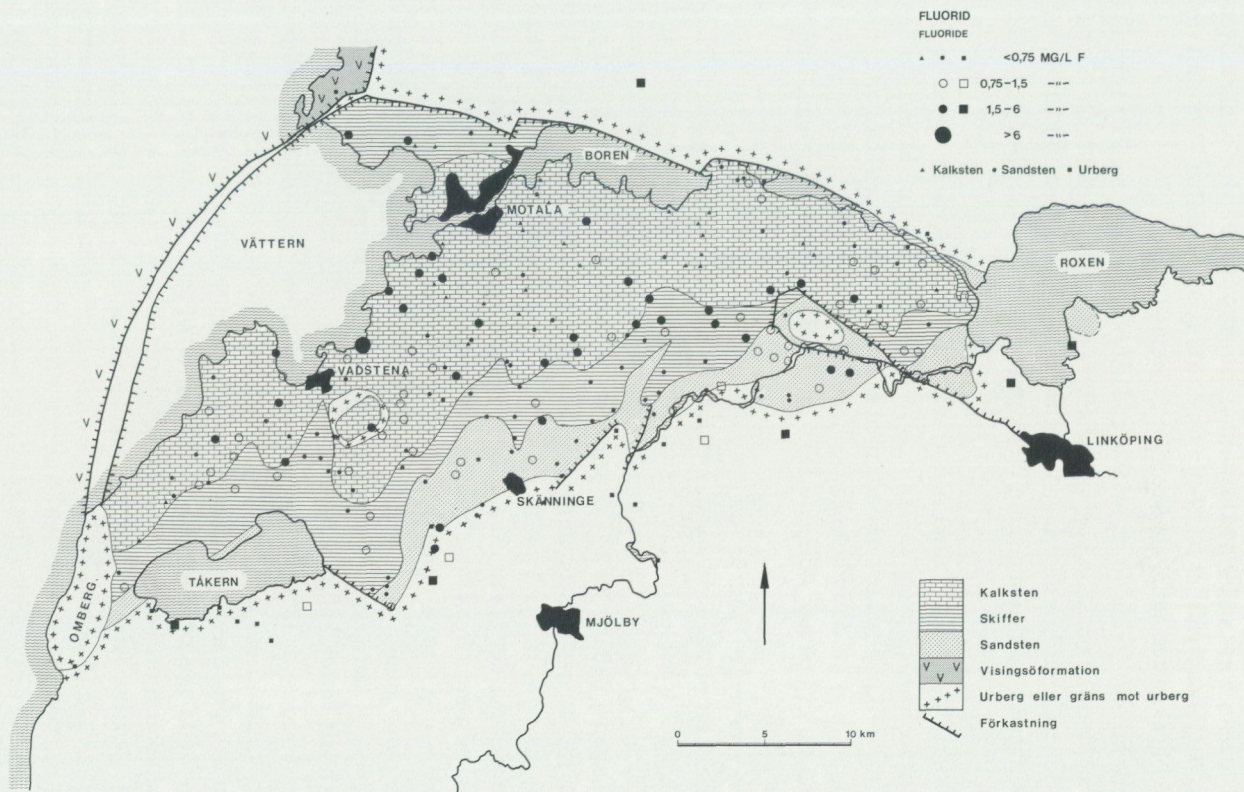
Av 515 undersökta brunnar inom detta kartbladsområde har 25% av brunnarna lämpliga fluoridhalter medan 60% har fluoridhalter under 0.75 och 14% har halter mellan 1.5 och 4 mg/l F. 1% har halter över 4 mg/l F och av dessa är det endast en brunn som har en fluoridhalt över 6 mg/l F. Den brunnen är belägen vid Vätternbaden söder om Motala. Den används numera inte till dricksvatten. Ingen av de rena kalkstensbrunnarna (31 analyser) eller rena skifferbrunnarna (3 analyser) har fluoridhalter över 0.75 mg/l F. Vatten från dessa brunnar ger alltså inget skydd mot karies, se fig. 11.

De brunnar som är borrhade till olika lager under kalkstenen har däremot högre fluoridhalter än övriga brunnar. Inom denna grupp finns även de procentuellt sett flesta brunnarna med ur kariesprofylaktisk synvinkel väl avvägd fluoridhalt. Även bland de brunnar som är borrhade genom skiffer ned till urberget finns det många vilka har lämplig fluoridhalt. Vatten från övriga typer av brunnar har i stort sett jämn fördelning mellan låga och höga fluoridhalter.

4.3.5. Klorid

Grundvatten med höga halter av klorid har påträffats i djupt borrhade brunnar i såväl sandsten som urberg. Se Pl. 5 och fig. 12. Kloridhalter mellan 100 och 300

Fig. 11. Karta över fluoridhalten i brunnar från olika akviferer.
Map showing fluoride contents in wells sunk in different aquifers.



mg/l Cl anses ur teknisk synpunkt anmärkningsvärda. Då kloridhalten överstiger 300 mg/l Cl skall vattnet bedömas som med tvekan tjänligt. Vid omkring 300 mg/l Cl brukar den salta smaken börja kännas.

I omkring 4% (= ca 25 st) av alla undersökta brunnar, som uppgår till drygt 600, var kloridhalterna så höga att smakgränsen var uppnådd. De högsta koncentrationerna har konstaterats i djupt borrade brunnar som får sitt vatten från den kambriska sandstenen inom ett område söder om sjön Boren, se tabell 24 analys nr 24.

Sandstenen är där nedsänkt och avskild från omgivande sandsten genom förkastningar. Se Pl. 2 profil D—D' och E—E'. Inom ett område norr om Omberg vid Vättern finns ett annat område med salt vatten i sandsten. Dessa brunnar har salt vatten trots att de endast borrats ned till omkring 30 m ö.h. Det salta vattnet uppträder alltså på helt skilda nivåer i sandstenen i de två områdena. Differensen är hela 60 m.

Även i urberget utanför sedimentområdet har salt vatten påträffats i flera brunnar. I ett område vid Kaga, sydväst om sjön Roxen, uppmättes den högsta kloridhalten, 1 750 mg/l Cl i en brunn som nådde ned till en nivå av 34 m u.h, se tabell 25 analys nr 23. I en närbelägen brunn som nådde ned till 124 m u.h. var kloridhalten 1 010 mg/l Cl. Tidigare har det salta vattnet i Östergötland ansetts vara en rest av det havsvatten i vilket sandstenen avlagrats (Thorslund 1950/51). Då salt vatten naturligt även förekommer i brunnar borrade i urberg (Engqvist 1969) förefaller det mindre sannolikt att ursprunget skulle vara det havsvatten i vilket sandstenen avlagrats. Sammanställningar av uppgifter rörande brunnar med salt vatten visar att praktiskt taget alla brunnar med sådant vatten är belägna i områden som efter senaste nedisningen varit täckta av hav (Knutsson & Fagerlind 1977). Det är därför sannolikt att det salta vattnet härrör från ett sådant hav. Sådant vatten kallas numera i Sverige för relict salt vatten.

När området var täckt av hav var "grundvattnet" oblandat havsvatten. När landet efterhand höjde sig över havsytan förträngdes saltvattnet genom nederbörden och den naturliga grundvattenströmningen från de övre jord- och berglagren. Detta skedde olika snabbt och till olika djup beroende på variationer i permeabilitet i jord- och berglagren och därav följande cirkulationshastighet för vattnet. Tektoniska förhållanden spelar också en stor roll i detta sammanhang. Genom att grundvattnets naturliga strömning och omsättning i regel avtar med djupet och på grund av det salta vattnets högre densitet kan detta vatten när det väl trängt in i berggrunden stanna i berget under långa tider. Riskerna för att påträffa salt vatten ökar ju djupare man borrar. Samtliga brunnar med salt vatten har varit djupare än 40 m under markytan.

Salt vatten kan även härröra från någon form av mänsklig aktivitet. Då kan naturligtvis salt vatten även finnas på mycket ringa djup. Läckande saltupplag, vägsaltning, läckage från urinbrunnar och avlopp eller lakvatten från avfallsupp-

lag är exempel på hur klorid kan tillföras grundvattnet.

Kartan i fig. 12 visar områden där salt vatten har påträffats och områden där risk för att påträffa salt vatten bedöms som stor. Sött vatten kan förekomma inom områden som markerats som riskområden för salt vatten.

4.3.6. Kväveföreningar

Höga halter av kväveföreningar i grundvattnet kan nästan alltid anses vara orsakade av någon form av mänsklig aktivitet. Det kan vara fråga om påverkan genom jord- eller skogsbruk, utsläpp av avloppsvatten eller läckage från upplag av avfall och slam. Vissa industrier kan även sprida kväveföreningar. Organiska kväveföreningar förekommer också i en del bergarter t.ex. alunskiffer. Det anses emellertid att någon utlösning av kväveföreningar ur alunskiffen inte är av någon större betydelse i detta sammanhang. I viss omfattning tillförs kväve även grundvattnet genom nederbörden.

I grundvattnet förekommer kväve i form av nitrat, NO_3 , nitrit, NO_2 , och ammonium, NH_4 . Kvävet är av stor betydelse för det biologiska livet. Tillförseln av kväveföreningar till grundvattnet kommer därför att växla med årstiderna. De högsta halterna uppstår framför allt under höst och vår. Under sommaren tar växterna hand om kvävet. Under vintern blir kvävetillskottet lågt genom den då låga grundvattennybildningen. Provtagningen för denna undersökning har skett under sommarmånaderna. Hade provtagningen skett under våren eller hösten hade kanske kvävehalterna varit något högre. Å andra sidan är vattnet i ett stort antal brunnar enligt tritiumresultaten betydligt mycket äldre än ett år. Detta skulle då innebära att säsongsvariationerna ändå inte skulle kunna göra sig gällande. Höga halter av kväveföreningar förekommer oftast i brunnar med höga tritiumhalter, dvs. brunnar med relativt ungt vatten. Bland de undersökta brunnarna hade cirka 1% nitralthalter över 50 mg/l NO_3 . Vid nitralthalter överstigande 50 mg/l NO_3 skall enligt socialstyrelsen inte vattnet ges åt barn under 1 års ålder, se även tabell 21. Nitralthalter mellan 30 och 50 mg/l NO_3 förekom i 2% av brunnarna. Övriga brunnar hade halter understigande 30 mg/l NO_3 . Från andra undersökningar är det känt att höga halter av kväveföreningar förekommer inom de ytliga grundvattnen speciellt inom områden med sandjordar. På dessa odlas ofta potatis som tillförs stora mängder konstgödsel. Då grävda brunnar ej omfattas av denna undersökning har effekterna av denna hantering ej kunnat registreras.

Ammoniumhalter över 0.5 mg/l NH_4 har cirka 7% av de undersökta brunnarna. Höga ammoniumhalter förekom inte i brunnar borrhade genom enbart sandsten, kalksten—urberg och kalksten—skiffer utan i andra typer av akviferer.

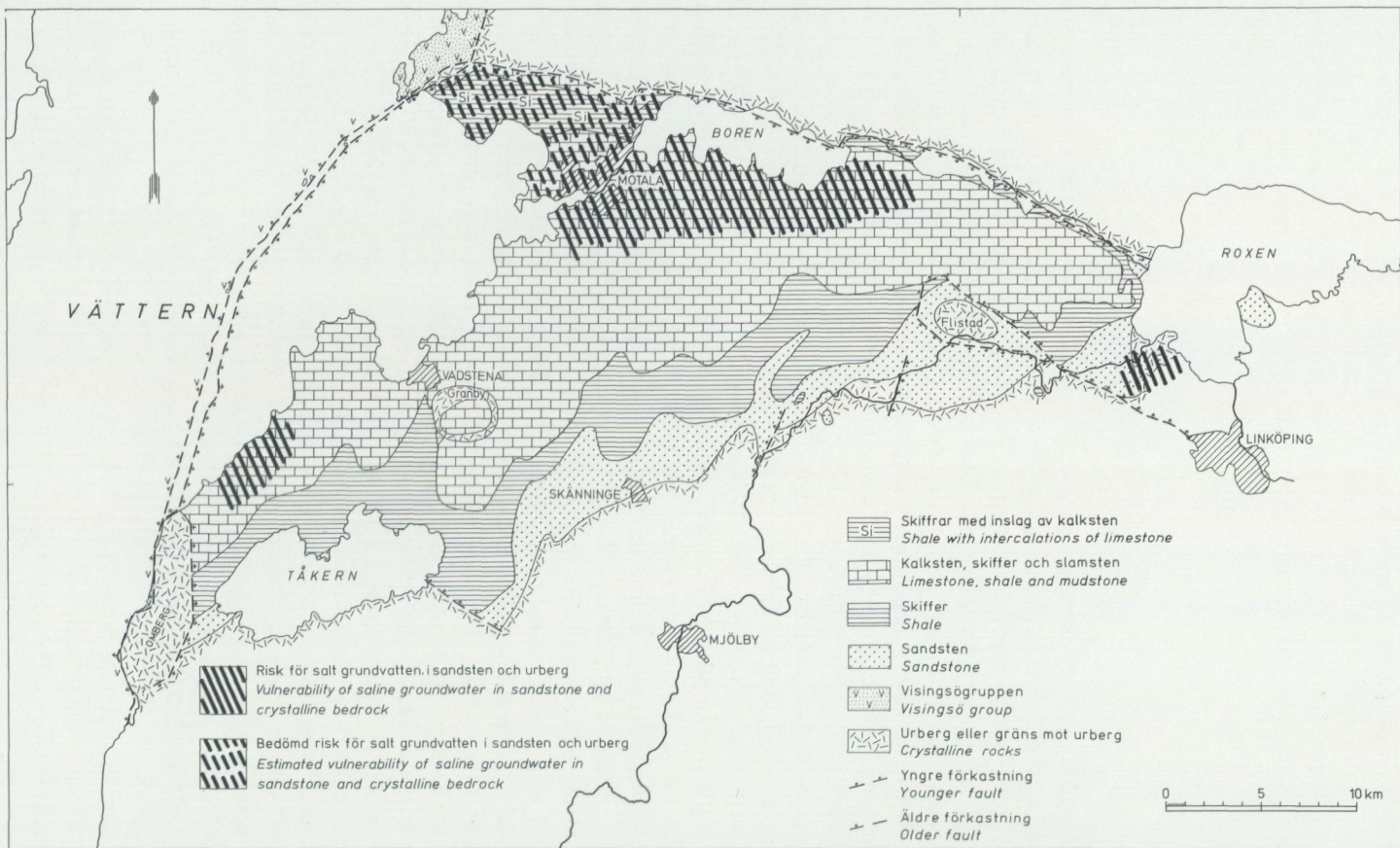
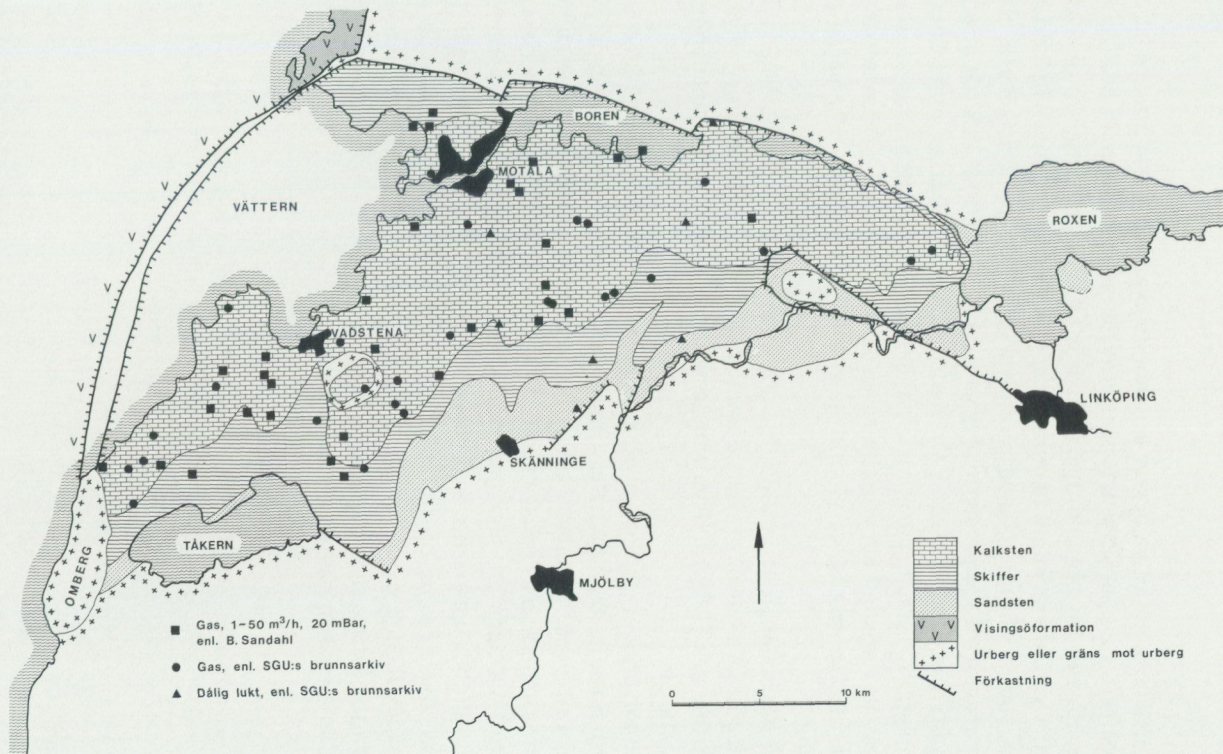


Fig. 12. Karta över områden där salt vatten påträffats eller förmodas förekomma.
Map showing areas where saline water has been observed or is supposed to be found.

Fig. 13. Kartan visar brunnar där gas har påträffats.
 Map showing wells in which gas has been observed.



4.3.7. Gas

När man på Östgötaslätten borrar ned mot den kambriska sandstenen händer det att gas påträffas i alunskiffern, lerskiffern eller allra vanligast i sandstenen. Kartan i fig. 13 visar var brunnar med gas påträffats. Uppgifterna om gasförekomsterna har i viss utsträckning hämtats från SGU:s brunnarkiv. Huvuddelen har välvilligt ställts till förfogande av förre gasverksingenjören Bertil Sandahl. Exempel på gasernas sammansättning ges i tabell 6. Av SGU utförda utredningar beträffande gasförekomsterna i Östergötland visar att gasen uppträder lokalt och att några större samlade mängder ej har påträffats. Därför saknas förutsättningar för att i större skala utnyttja gasen som energikälla. I gynnsamma fall anses dock tillgångarna räcka till för uppvärmning av någon eller några enstaka fastigheter.

Gasen har sedan 1945 använts för uppvärmning av industrilokaler i Tornby (nu nedlagd). Den har på senare tid även använts för uppvärmning av byggnader i bl.a. Broby och Hilltorp. Totalt motsvarar den nyttjade gasmängden inte fullt 100 m³ olja/år.

Någon allvarlig olycka har såvitt bekant inte inträffat i Östergötland orsakad av utströmmande naturgas. Det finns emellertid alltid risk för explosion vid brunnar som avger brännbara gaser. Bland annat från Närke finns exempel på hur utströmmande naturgas orsakat allvarliga olyckor. Explosionsrisken ökar om gasen får tränga in i en sluten anläggning. För undvikande av explosioner med naturgas bör därför inte några arbeten företas i slutna anläggningar där gasrisk finns innan en omsorgsfull vädring, eventuellt genomblåsning av anläggningen skett. Rökning och förande av annan öppen eld bör heller inte ske i anläggningarna. I detta sammanhang bör det påpekas att även gnistor från elektriska installationer kan starta explosioner.

TABELL 6. Analyser av naturgas från Östergötlands sedimentära berggrund (vol.-%)
Analyses of natural gas from the sedimentary bedrock of Östergötland (vol.%)

	N ₂	CO ₂	CO	O ₂	CH ₄	Övriga kolväten	H ₂	He
Vadstena	5.6	0.1	0.2	—	93.0	0.2	—	0.00047
Bonderlunda	10.4	0.6	0.4	—	87.2	0.5	—	0.0078
Broby	14.5	0.0	0.0	—	78.6	6.9	—	—
Broby	19.1	0.0	0.0	—	69.6	11.3	—	—
Bårstad	23.1	0.0	0.0	0.8	76.1	0.0	0.0	0
Granolund	40.5	0.1	0.0	0.7	58.4	0.0	0.0	0
Tornby	28.8	0.1	0.0	0.4	70.7	0.0	0.0	0

Analyserna är hämtade från C.-F. Müllern (1974).

4.4. Grundvattnet i de olika akvifererna

4.4.1. Kalkstensakviferen

Fysikalisk-kemiska vattenanalyser har utförts på 31 prover från brunnar borrade i ordovicisk kalksten. Exempel på analyser av vatten från brunnar borrade i kalksten finns i tabell 24, analyserna 1 och 2. Som framgår av tabell 23 varierar de provtagna brunnarnas djup mellan 9 och 132 m. Mediandjupet är 34 m. Genom att kalkstenen innehåller kalcium och magnesium, som gör vattnet hårt, kan man vänta sig att vattnets totalhårdhet skall vara hög i kalkstensbrunnarna. Som framgår av fig. 9 ligger också totalhårdheten för cirka 80% av alla undersökta kalkstensbrunnar mellan 70 och 150 mg/l Ca. Det vill med andra ord säga att vattnet enligt den i Sverige vedertagna skalan skall betecknas som "hårt", se tabell 21. Övriga kalkstensbrunnar har "medelhårt vatten", mellan 35 och 70 mg/l Ca. Ingen brunn har "mycket hårt vatten" det vill säga över 150 mg/l Ca.

Magnesiumhalterna i kalkstensbrunnarna ligger något högre än för övriga brunnar inom den sedimentära berggrunden. Medianvärdet är 10 mg/l Mg. Kaliumhalterna är i regel låga och varierar normalt mellan 1.0 och 3.0 mg/l K. I fyra brunnar har emellertid betydligt högre halter uppmätts, 55, 35, 23 och 13 mg/l K. I två av dessa brunnar är även kvävehalterna höga. Man kan därför misstänka att de höga kaliumhalterna orsakats av tillförsel av konstgödselpreparat av kaliumnitrattyp. Höga kaliumhalter kan även uppträda i samband med att nya cementringar monterats i de provtagna brunnarna. Om så är fallet för dessa brunnar har ej undersökts.

Kalkstenvattnets pH-värden ligger mellan 7.5 och 8.0. Sulfat- och kloridhalterna är låga liksom manganhalterna. Däremot finns det många brunnar med höga järnhalter, se fig. 8. Medianhalten för järn är 0.58 mg/l Fe. Då man redan vid halter överstigande 0.2 mg/l Fe brukar beteckna vattnet ur teknisk synpunkt som anmärkningsvärt, är det sannolikt att det på många håll är problem med höga järnhalter. Framför allt i samband med tvätt utgör höga järnmängder i vattnet ett problem. Genom att vattenproverna surgjorts redan i fält kan järnhalterna vid SGU:s provtagning vara något högre än vid konventionell provtagning.

4.4.2. Skifferakviferen

Totalt har 15 brunnar som avslutats i skiffern provtagits. I tolv av dessa var skiffern täckt med kalksten, övriga 3 saknade överlagrande bergart. Sistnämnda typ är alltså dåligt representerat i detta material och detta bör man ha i åtanke när man betraktar figurer och tabeller. Proverna visar dock att vattnet inte är av särskilt hög kvalitet. Höga halter av järn, sulfat gör bl.a. vattnet mindre lämpat som

dricksvatten. Vattnet är dessutom hårt, se tabell 24 analys nr 10.

Bland kalksten—skifferbrunnarna (12 st) har 5 höga pH-värden, natriumhalter och fluoridhalter medan kalcium- och bikarbonathalterna är låga. För vattnet i de återstående 7 brunnarna gäller det motsatta förhållandet. Anmärkningsvärt höga halter av kväveföreningar har inte påträffats i skifferakviferen. För övriga halter hänvisas till tabell 23 och tabell 24, analyserna nr 3 och 4.

4.4.3. Sandstensakviferen

Den största akviferen inom Östergötlands sedimentära berggrund är sandstensakviferen. Grundvattnets sammansättning i sandstenen påverkas i viss utsträckning av förekomsten eller avsaknaden av överlagrande bergartsled. Inom stora områden vilar skiffer närmast ovanpå sandstenen, vilket framgår av Pl. 1 och 2. Skiffern är inom stora områden täckt av ordovicisk kalksten. I de nordvästra delarna av sedimentberggrundsområdet förekommer siluriska kalkstenar och skiffrar som översta lager. I sistnämnda område är sandstenen så djupt belägen under markytan att det knappast finns någon brunn som når ända ned till den. Kännedom om vattnets beskaffenhet i denna del av sandstensakviferen är därför mycket dålig. Med kännedom om att vattnet i angränsande delar av sandstenen på stora djup är salt ligger det nära till hands att förmoda att även vattnet i den kambriska sandstenen under de siluriska avlagringarna är salt. Fig. 12 visar var salt vatten har påträffats och var man kan förmoda att salt vatten skall finnas.

I tabell 23 visas median- och medelvärden m.m. för de olika ämnena i grundvattnet, ordnade efter förekomsten av omgivande bergarter. I detta sammanhang har alla brunnar som borrhats genom sandsten betraktats som sandstensbrunnar. Sandstenen antas vara den bergart som svarar för huvuddelen av tillrinningen till dessa brunnar. Exempel på sandstenvattnets sammansättning finns i tabell 24, analyserna 5 — 9 och 11 — 16. I sandstenen finns tre typer av vatten, *kalciumbikarbonat-*, *natriumbikarbonat-* och *natriumkloridvatten*. Sistnämnda typ behandlas under kapitlet 4.3.5.

Merparten av sandstensbrunnarna eller närmare bestämt 70% är av kalciumbikarbonattyp. Dessa har pH-värden mellan 7.0 och 8.0. Den specifika ledningsförmågan är här något högre än i natriumbikarbonatvatten. Den höga kalciumhalten gör vattnet "hårt". Mera sällan förekommer "mycket hårt" vatten. Se fig. 9. Fluoridhalterna är låga medan järn-, sulfat- och bikarbonathalterna är förhållandevis höga. Denna typ representeras av analyserna nr 6, 8, 12, 14 och 15 i tabell 24.

Cirka 30% av sandstensbrunnarna har natriumbikarbonatvatten. Det vill säga att natrium är den dominerande katjonen och bikarbonat den dominerande anjonen, se tabell 24, analyserna 5, 7, 9, 11 och 16. pH-värdet ligger högre inom den-

na typ av vatten än inom föregående. Värdet varierar mellan 7.6 och 8.8. Såväl den specifika ledningsförmågan som halterna av kalcium, magnesium, järn och sulfat är lägre. Även bikarbonathalterna är lägre hos denna typ av vatten. I båda vattentyperna är permanganatförbrukningen och manganhalterna vanligtvis mycket låga. I jämförelsen har inte vatten med kloridhalter över 50 mg/l Cl medtagits då den höga andelen natrium i dessa vatten kan tänkas härröra från salt vatten av annat ursprung. Även övergångsformer mellan de olika typerna förekommer. Det är dock inte så vanligt. Exempel på detta finns i tabell 24, analys nr 13.

Inom Östgötaslätten är det brukligt att man inom ett område tar sitt vatten från kalkstenen och inom ett annat från sandstenen. Det är sällsynt att man inom ett och samma område tar vatten ur flera olika akviferer. Det förekommer dock. För att visa olikheterna i grundvattnets sammansättning i olika akviferer har ett sådant område utvalts söder om Motala, se fig. 14. Området är cirka 100 km² stort. Inom detta har analysresultat från 18 brunnar studerats. Analyserna har sammanställts i ett diagram, fig. 15. Analyserna är ordnade efter brunnsbottnarnas lägen i förhållande till havsytans nivå. Diagrammet visar huvudelementen i milliekvivalenter per liter (mekv/l). Även värden för pH och fluorid finns med i diagrammet. Tritiumhalterna i tritiumenheter har angetts för två brunnar. Bestämning har inte gjorts på övriga. Lagerföljden för de olika brunnarna finns också i diagrammet.

Som framgår av kapitel 3 sker bl.a. nybildning av grundvatten till sandstenen inom ett område cirka 7 km öster om Vadstena inom den s.k. Fivelstadsplatån. På grund av att grundvattennivån i sandstenen är lägre än i jordlagren—kalkstenen sker en strömning av grundvatten från de övre lagren ned i sandstenen inom detta område. Motsatta förhållanden råder på sina håll inom ett område vid Vättern mellan Vadstena och Motala. Av tryckförhållandena kan man där se att förutsättningar finns för att grundvatten kan strömma upp från sandstenen. Grundvattnets tryckyta i sandstenen ligger där något över markytans nivå i några brunnar.

Varför har nu sandstensvattnet mycket lägre totalkoncentrationer än det vatten som infiltrerar till sandstenen, nämligen kalkstensvattnet? Undersökningens resultat ger inte ett fullständigt svar på den frågan men här skall två försök lämnas till förklaring av att förhållandena är som de är.

När vattnet strömmar i berggrunden från kalkstenslagren till sandstenslagren passerar vattnet skifferlagren. Konsoliderade leror, t.ex. skifferar kan under vissa förhållanden uppträda som semipermeabla membran (Back & Hanshaw 1965). Ett semipermeabelt membran definieras som ett membran som förhindrar passage av laddade ämnen men tillåter passage av oladdade ämnen. När en elektrolytlösning strömmar genom ett semipermeabelt membran inträffar ultrafiltrering. Som resultat av denna process kommer den lösning som passerat membranet att ha lägre koncentration än originallösningen. Sedan länge har man begä-

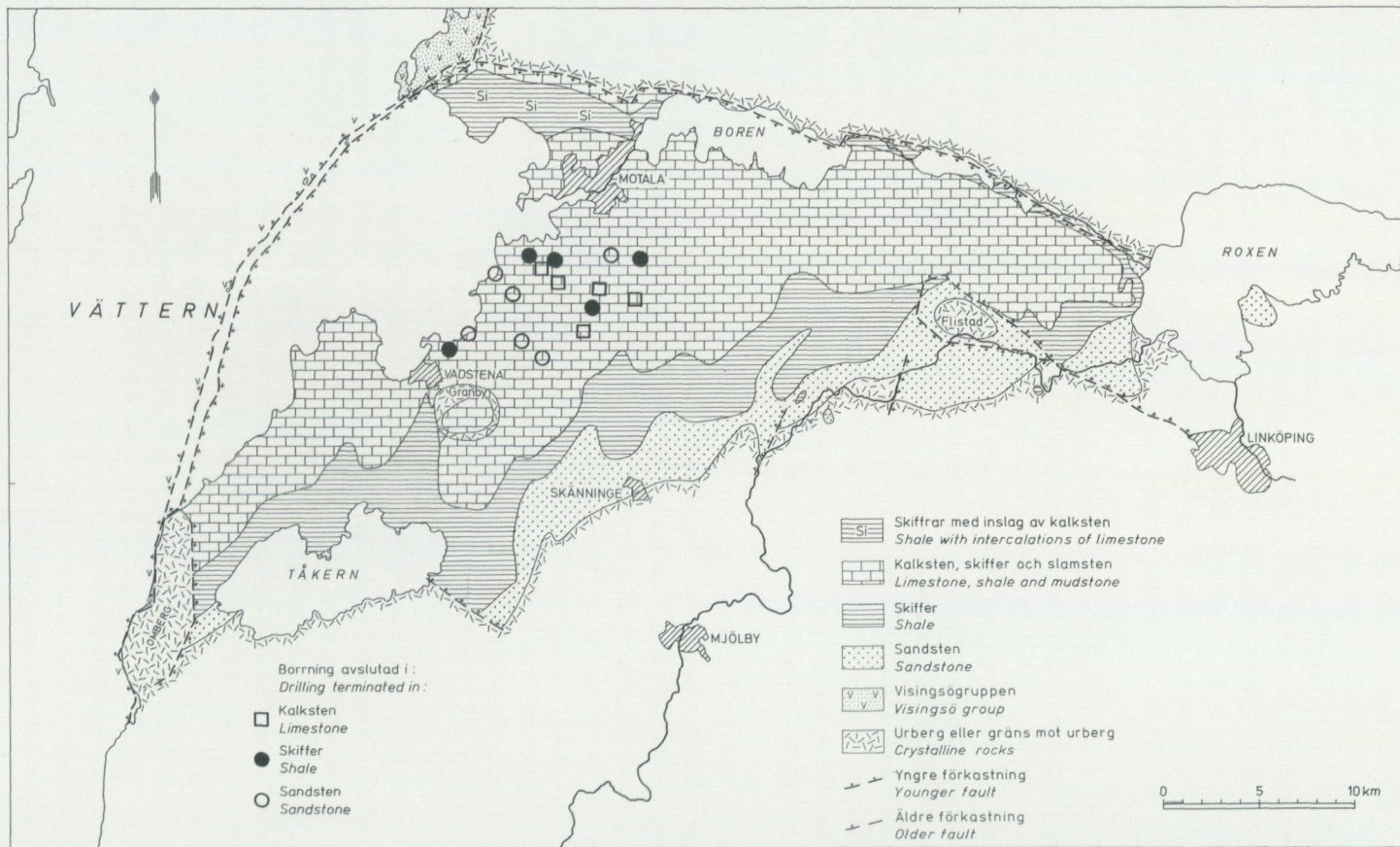


Fig. 14. Kartan visar läget för de i fig. 15 och 17 behandlade brunnarna.
 Map showing the location of the wells treated in Figs. 15 and 17.

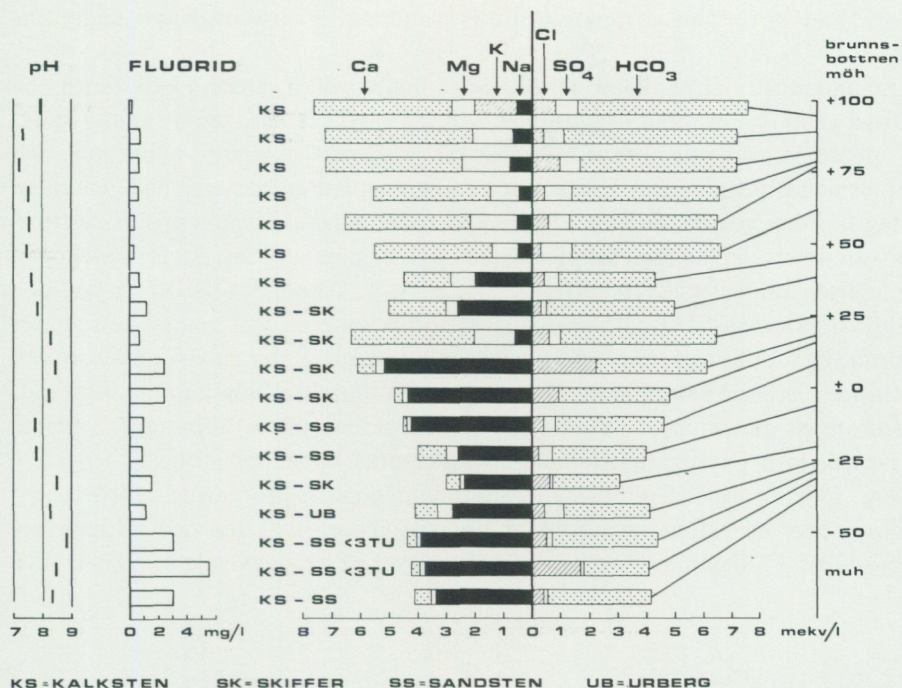


Fig. 15. Grundvattnets kemiska sammansättning i relation till brunnsbottenarnas nivåer och omgivande berggrund inom ett område söder om Motala. Brunnarnas lägen framgår av fig. 16. TU = tritiumenheter.

The chemical composition of groundwater in relation to the level of the bottom of the wells and the surrounding bedrock. The wells are located in an area to the south of Motala as shown in Fig. 16. TU = tritium units.

nat sig av hypotesen med membranfiltrering för att förklara uppkomsten av de höga saltkoncentrationer i berggrunden som ofta är associerade med petroleumförekomster. För vanligt dricksvatten har Wood (Wood 1976) framfört en hypotes om jonfiltrering för att förklara skillnader i grundvattnets sammansättning i olika akviferer i ett område beläget i Michigan, USA. Utifrån Woods artikel har Engqvist (Engqvist 1979) antytt att skillnaderna i grundvattnets sammansättning i de olika akvifererna i Östergötlands sedimentära berggrund skulle kunna vara en följd av jonfiltrering. Förutsättningar finns för att en jonfiltrering skall kunna ske i det här specialstuderade området. De tryckskillnader i grundvattnet som fordras för att tvinga vattnet genom jonfiltret finns liksom förekomsten av lämpliga lerskiffrar. Något som skulle tala emot jonfiltrering är att kloridhalterna inte undergår någon påtaglig reduktion vid passerandet av skiffrarna. Detta borde ske. Nu kan emellertid klorid uppträda litet här och var i dessa avlagringar eftersom hela berggrunden en gång måste ha varit helt fylld med salt grundvatten

Klorid kan därför kanske tänkas tillföras grundvattnet såväl ovan som under filtret.

En annan förklaring till att det är stor skillnad mellan vattnet i kalkstenen och vattnet i somliga brunnar i sandstenen kan vara att förändringen orsakas av andra processer än membranfiltrering, till exempel oxidation-reduktion och upplösning-utfällning etc. När koldioxidrikt, surt vatten passerar ned genom en avlagring sker genom vittring utlösning av olika mineral. Denna process förbrukar vätejoner, det vill säga att pH-värdet höjs. Genom att jämviktsförhållandena då ändras kommer kalciumkarbonat att fällas ut. Då något tillskott av syre och koldioxid knappast kan tillföras på större djup kommer halterna av dessa gaser att minska mot djupet. Om vattnets syrehalt minskar under en viss nivå kan, om sulfatreducerande bakterier är närvarande, en sulfatreduktion komma till stånd. Förutom en minskning i sulfathalten kan detta leda till en höjning av vattnets pH-värde med ytterligare utfällning av kalciumkarbonat som följd.

Fig. 16 är ett Piperdiagram som visar huvudämnenas procentuella fördelning i olika prover på vatten från brunnar borrade genom kalksten ned till urberget (KS—UB). Fördelningen av ämnena är uttryckt i milliekvivalentprocent. Två

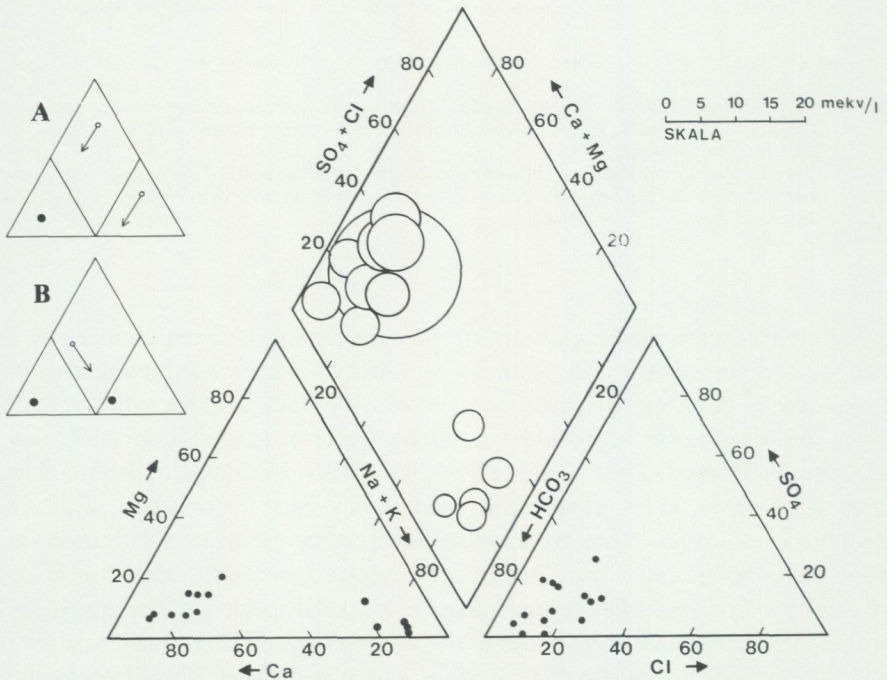


Fig. 16. Piper-diagram för vatten från brunnar borrade genom kalksten-skiffer-sandsten ned till urberget (KS-UB).

Piper-diagram showing water from wells driven through limestone-shale-sandstone to the crystalline basement (KS-UB).

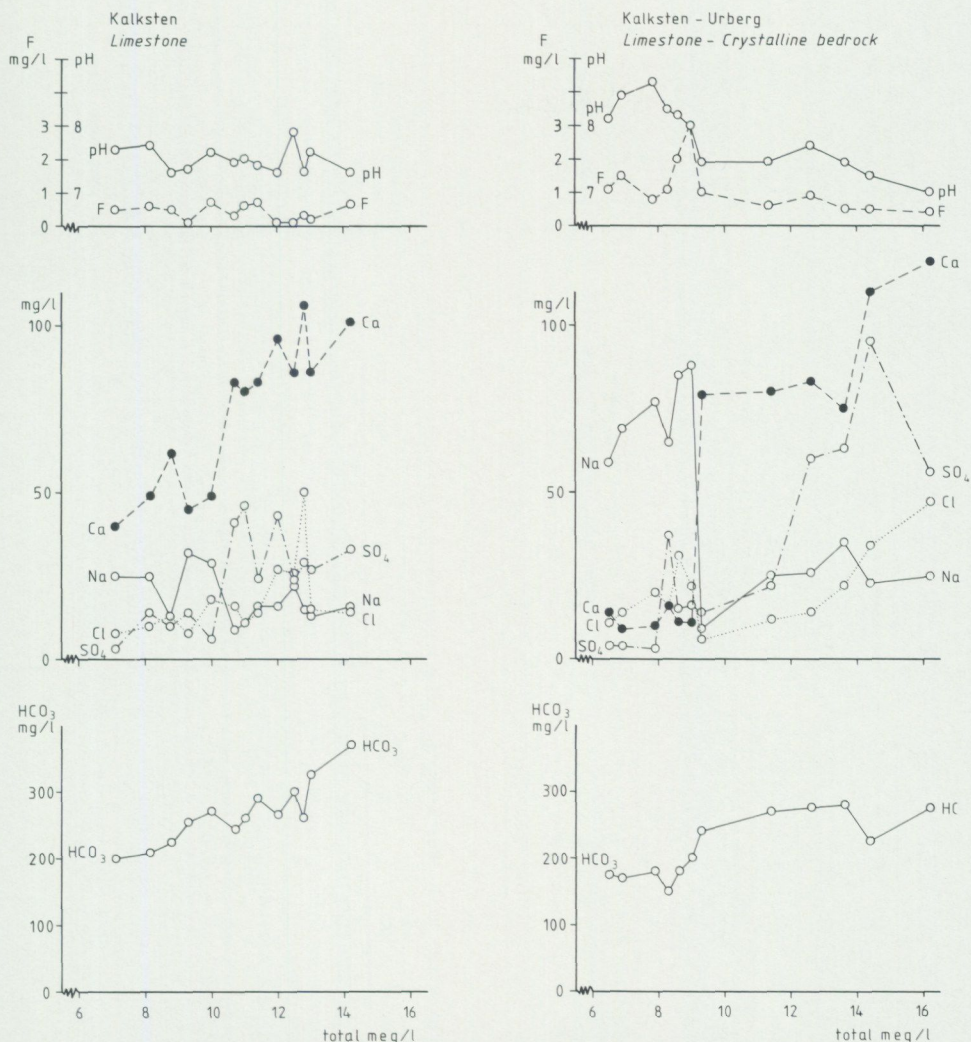


Fig. 17. Förhållandet mellan totalkoncentrationen och halterna av bikarbonat, sulfat, klorid, natrium, kalcium, fluorid och pH-värde för brunnar borrade i a, kalksten; b, kalksten-urberg. *Relation of total dissolved solids to bicarbonate, sulphate, chloride, sodium, calcium, fluoride and pH value in wells sunk in a, limestone; b, limestone-crystalline basement.*

mindre trianglar märkta A respektive B visar hur olika processer kommer till uttryck i denna typ av diagram. A skall visa sulfatreduktion och B jonbyte som resulterar i att vattnet blir mjukare. Cirklarnas storlek i huvuddiagrammet anger totalkoncentrationerna i milliekvivalenter per liter (mekv/l). Av diagrammet kan man utläsa att vatten som genomgått jonbyte har lägre totalhalter och att även sulfathalterna är lägre.

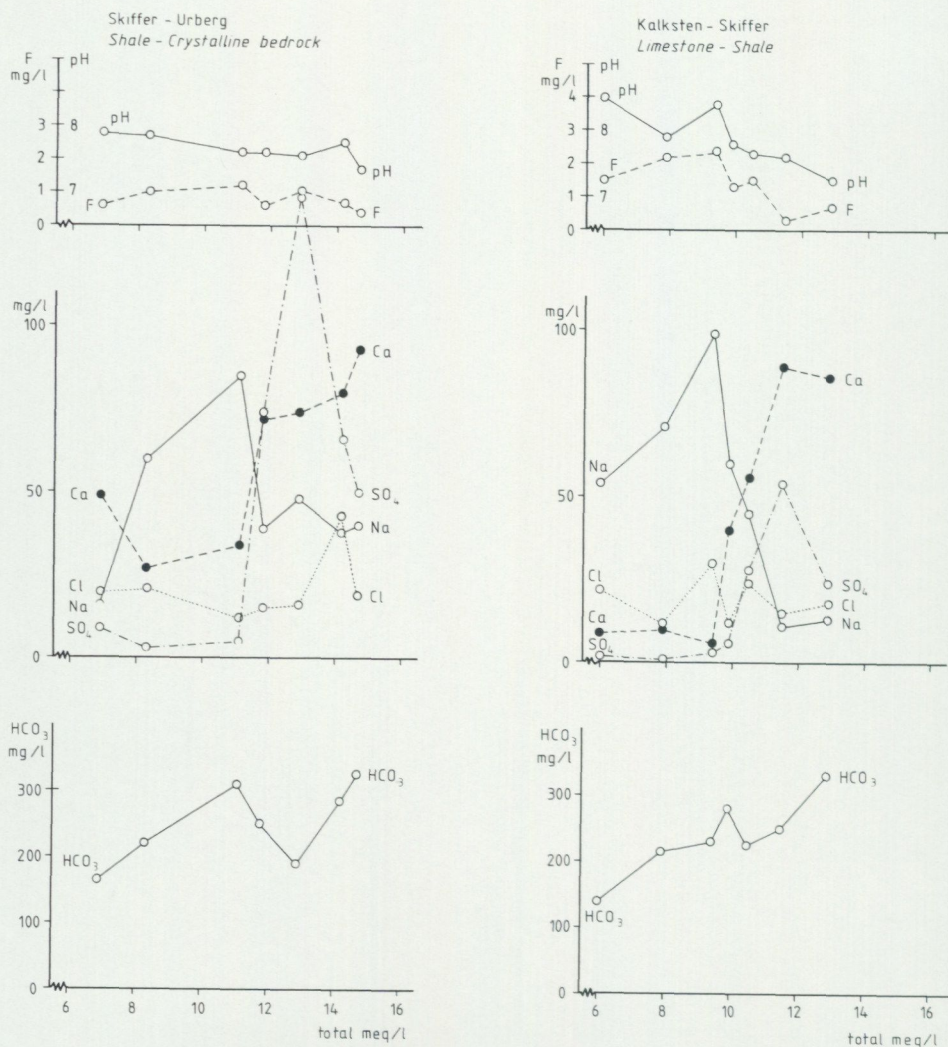
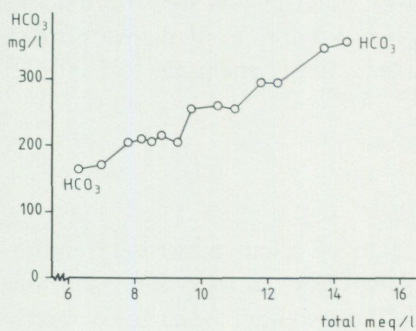
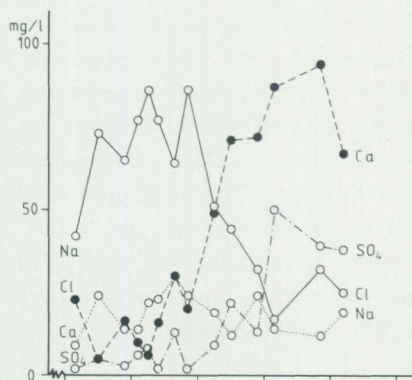
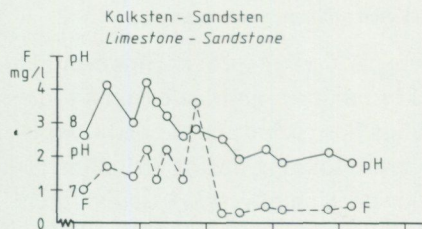


Fig. 18. Förhållandet mellan totalkoncentrationen och halterna av bikarbonat, sulfat, klorid, natrium, kalcium, fluorid och pH-värde för brunnar borrhade genom a, skiffer-urberg; b, kalksten-skiffer; c, kalksten-sandsten ned i urberg.

Relation of total dissolved solids to bicarbonate, sulphate, chloride, sodium, calcium, fluoride and pH value in wells sunk through a, shale-crystalline basement; b, limestone-shale; c, limestone-sandstone to the crystalline basement.

Om man ordnar analyserna efter totalhalterna kan man se att brunnar som genomgått jonbyte har lägre totalhalter, se fig. 17 och 18. Bland kalkstensbrunnarna finns det ingen brunn med jonbyte enligt fig. 17. För brunnar borrhade genom kalksten ned till urberget, dvs. samma brunnar som i Piperdiagrammet i fig. 16, ser man i fig. 18 en markant förändring i kalcium- och natriumförhållandet mel-



lan låga respektive höga totalkoncentrationer. För samtliga typer av brunnar i sandstenen är bilden i stort sett densamma. Övergångszonen i diagrammet där kalcium och natrium byter plats är dock något större inom vissa typer av akviferer.

4.4.4. Urbergsakviferen söder om området med sedimentära bergarter

Fullständig fysikalisk-kemisk analys har utförts på 27 vattenprover från brunnar borrade i enbart urberg. Med undantag av två brunnar är samtliga belägna söder om sedimentberggrundsområdet. Dessa två finns norr och öster om detta område. Urbergsbrunnarna har medtagits i denna undersökning därför att sedimentberggrunden även i viss utsträckning genom jordarterna påverkar grundvattnets sammansättning i urberget. Exempel på analys av urbergsbrunnar finns i tabell 24, analyserna nr 17 och 18, se även tabell 23. Medianvärdet för urbergsbrunnarnas djup är 56 m. Den djupaste brunnen är 127 m och den grundaste endast 10 m djup. Vattnets pH-värde i brunnarna varierar mellan 7.1 och 9.0 med medianvärdet 7.4. I allmänhet är vattnets specifika ledningsförmåga högre i urbergsbrunnarna än i sedimentberggrundsbrunnarna, med undantag för de salta brunnarna. Medianvärdet för specifika ledningsförmågan är $722 \mu\text{S}/\text{cm}$. De högsta respektive lägsta värdena är 1 680 och $311 \mu\text{S}/\text{cm}$. Det finns ett klart samband mellan vattnets hårdhet och den specifika ledningsförmågan i dessa brunnar. "Hårt" vatten har 44% av brunnarna och "mycket hårt" vatten har 37%, se fig. 10. Mjukt vatten har de brunnar som ligger norr och öster om sedimentberggrunden. Höga järnhalter är ett vanligt problem när det gäller urbergsbrunnarna. Omkring 60% av brunnarna har järnhalter över 0.4 mg/l Fe. Medianvärdet för järn är 0.47 mg/l Fe. Manganhalterna är låga. Det högsta värdet är 0.63 mg/l Mn. Cirka 20% av brunnarna har halter över 0.1 mg/l Mn. Fluoridhalter över 1.5 mg/l F har påträffats i fyra brunnar. Högsta noteringen är 4.2 mg/l F. Medianvärdet för fluorid är 0.64 mg/l F. Några brunnar borrade i enbart urberg har salt vatten. Dessa behandlas i kapitlet 4.3.5, klorid.

4.4.5. Övriga akviferer

Inom området med silurisk skiffer har prov tagits på grundvattnet i ett mindre antal brunnar. Brunnarnas djup varierar betydligt. Som en följd därav går nog flera av dessa brunnar inte bara ned i de siluriska lagren utan även ned i de överordoviciska. I några av brunnarna är jorddjupet mäktigt. I en brunn (8ENO:68) har t.ex. ett jorddjup av 74 m mätts upp. I stort liknar analyserna från siluområdet de analyser som är tagna i brunnar borrade genom kalksten ned till skiffer, se tabell 23. Några brunnar har mjukt vatten, vilket tyder på att någon form av jonbyte ägt rum, se fig. 9. Dessa brunnar har även fluoridhalter över 1.5 mg/l F.

Från brunnar borrade i Visingsögruppens bergarter föreligger endast två analysresultat, se tabell 24, analys nr 22. Dessa visar att praktiskt taget alla analyserade ämnen förekommer i mycket låga halter. Detta överensstämmer med analysresultat från andra delar av Visingsögruppen, t.ex. från Hjo. I en av brunnarna är kalcium- och magnesiumhalterna dock så höga att vattnet skall betecknas som "hårt". Fluoridhalterna är i båda brunnarna mycket låga, under 0.4 mg/l F.

APPENDIX I

AV

JAN-ERIK ANDERSSON

Redogörelse för provpumpningarna

De flesta provpumpningarna utfördes i sandstensakviferen som vanligen överlagras av skiffer, kalksten och jordlager, oftast moränlera. I något fall förekom enbart jordlager över sandstensakviferen. Läget av de undersökta platserna framgår av fig. 4.

Provpumpning i en förkastningszon

För att bestämma de hydrauliska storheterna för en långsträckt akvifer utfördes en borrhning i en förkastningszon. Läget av denna lokaliserades med hjälp av seismiska undersökningar. Borrhningen gjordes ungefär mitt i förkastningszonen. Borrplatsen var belägen nordost om Odensfors, ca 10 km nordväst om Linköping, i ett flackt område som sluttar ned mot Svartån.

Borrhningen utfördes i augusti 1975 med sänkborrhammare. Brunnen är 55 m djup och försedd med foderrör genom jordlagren till ett djup av 15 m under markytan. Diametern på foderrören är 139 mm. Resterande del av brunnen är öppen och borrarad med 112 mm borkkrona. Markytan intill brunnen ligger ca 61 m ö.h.

Lagerföljd enligt brunnsprotokollet.

Djup (m)

0 — 1.5	Mjåla—finmo
1.5 — 7.0	Varvig lera
7.0 — 11.7	Moränlera
11.7 — 18.0	Kalksten
18.0 — 22.0	Svart skiffer
22.0 — 29.0	Grön skiffer
29.0 — 35.0	Sandsten
35.0 — 55.0 +	Urberg, röd granit (35 — 39 m löst urberg)

Som framgår av berggrundskartan, se fig. 4, är borrhningen belägen i en förkastningszon där urberget ligger direkt under de kvartära avlagringarna på den södra sidan. I norr anstår mer eller mindre uppspruckna delar av den sedimentära lagerföljden. Förkastningens språnghöjd uppgår till ca 40 — 45 m. Mäktigheten av de sedimentära bergarterna vid brunnen är reducerad, jämfört med normal mäktighet av dessa inom området enligt brunnsprotokoll från närbelägna borrhningar. Enligt berggrundskartan skall kalksten inte finnas vid denna lokal, men i prover tagna under borrhningsskedet påträffades dock denna bergart. Detta antyder att det här rör sig om en störd lagerföljd med troligen uppresta lager eventuellt i kombination med överskjutning.

Sandstenen betraktas som huvudakvifer. Vid provpumpningen erhöles dock tillskott av vatten från samtliga bergartsled (kalksten, skiffer och sandsten) på grund av dessa bergarters spruckna karaktär samt även från jordlagren. Under borrhningens gång ökade brun-

nens kapacitet successivt från ca 0.4 l/s i kalkstenen till ca 2.5 l/s vid borrningens avslutande i urberget. Man kan på grund av sprickigheten i detta fall inte "separera" enbart sandstensvattnet. Den vattennivå som uppmättes i brunnen är därför en sammansatt tryckyta som påverkats av alla ingående bergartsled samt av de kvartära avlagringarna.

Provpumpning

Under augusti — september 1975 utfördes en provpumpning av brunnen med 14 dagars varaktighet. Pumpkapaciteten hölls konstant på 1 l/s. Det uppumpade vattnet leddes bort via ett dike. Någon risk för återinfiltration förelåg ej. Pumpningen följdes av en återhämtningstest under ca 3 dagar. Observationsbrunnar saknades, varför vattennivåmätningar endast kunde ske i den pumpade brunnen.

Övergången till det hydrauliskt sett tätare urberget på ena sidan av förkastningen utgör en effektiv negativ gräns som tydligt framgår av provpumpningsdata. Sålunda ger en plottning av avsänkningskurvan mot pumptiden i ett semilogaritmiskt diagram ingen rät linje i detta fall, utan avsänkningskurvan böjer successivt av nedåt på grund av inverkan av negativa gränser (gränserna). Motsvarande effekt framgår även av det logaritmiska tid—avsänkningsdiagrammet (diagram 8). Detta är förutom akviferens sprickighet en annan anledning till att varken Theis—Waltons eller Jacobs extrapolationsmetod går att använda i detta fall.

Akviferens sprickiga karaktär och att den är begränsad till själva förkastningszonen medför att den lämpligaste metoden att uppskatta de hydrauliska parametrarna torde vara att tillämpa den s.k. kanalmodellen (Gustafson 1978). En annan möjlig metod är att använda den sprickakvifermodell, som utvecklats av Gringarten & Witherspoon (1972). Med hjälp av speciella typkurvor är det härvid i vissa fall möjligt att skilja mellan akviferer med horisontella eller vertikala sprickor.

Kanalmodell med läckage

Man betraktar härvid förkastningszonen som en kanal med ej täta gränser. På grund av avsaknaden av observationsbrunnar är en fullständig utvärdering av de hydrauliska parametrarna för förkastningszonen ej möjlig. En approximativ beräkning kan dock göras utgående från asymptoten, dvs. linjen med lutning 1:2 i det logaritmiska tid—avsänkningsdiagrammet (diagram 8). För att få ett rimligt utgångsvärde på transmissiviteten kan den första delen av datakurvan i diagram 8 jämföras med Theis' typkurva. Detta ger $T = 8.5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$. Vid denna beräkning har bortsetts från läckage, eftersom tiden efter pumpstart var kort. För att bestämma datakurvans asymptot för pumpbrunnen i det logaritmiska tid—avsänkningsdiagrammet utnyttjas formel (1). Faktorn C i formel (1) betecknar en extra avsänkning i pumpbrunnen och antar ett konstant värde efter viss tid. Beräkningen av asymptotens ekvation kan ske genom att sätta in två godtyckliga tidsvärden (t.ex. $t = 60 \text{ s}$ och $t = 600 \text{ s}$) och motsvarande avsänkning på asymptoten i formel (1). Ur detta ekvationssystem kan sedan produkten $TB \cdot SB$ beräknas.

Vid provpumpningens slutskede rådde i det närmaste stationära förhållanden på grund av läckaget. Avsänkningskurvan vid denna tid uppmättes till 6.7 m. Om man vid beräkningarna antar en ungefärlig kanalbredd $B = 50 \text{ m}$, dvs. förkastningszonens antagna bredd, kan dessa värden sättas in i (2), vilken gäller för stationärt flöde. För pumpbrunnen ($x = 0$) övergår formel (2) i (3). Härvid används det ovan beräknade T-värdet. Ur formel (3) kan sedan läckagefaktorn E beräknas och ur denna läckagekoefficienten BP'/m' . Denna koef-

ficient representerar i detta fall det totala läckaget till kanalen både ovanifrån och från sidorna. Någon beräkning av respektive läckagetillskotts storlek är ej möjlig att göra. Magasinskoefficienten S löses ur produkten $TB \cdot SB$ vilken är beräknad tidigare. Resultaten av beräkningarna framgår av tabell 7.

Modell för sprickiga akviferer

Enligt denna metod betraktar man akviferen som ett anisotropt, homogent och poröst medium med en enda spricka som genomsätter akviferen. Om man bortser från första delen av kurvan i diagram 8 märks den räta linjen med ungefärlig lutning 1:2, som är kännetecknande vid pumpning ur sprickiga akviferer. Den senare delen av datakurvan i diagram 8 förefaller bäst kunna inpassas med typkurvorna för den horisontella sprickmodellen enligt Gringarten & Witherspoon. I praktiken förekommer dock troligtvis en kombination av horisontella och vertikala sprickor i detta fall.

Matchpunktens koordinater (s_D , t_D , s , t) samt H_D erhålles genom inpassning med ovan nämnda typkurvor. Dessa värden insätts sedan i formlerna (4), (5) och (6). Som uppskattning av magasin-koefficienten S används lämpligen det värde som beräknats ur föregående metod. Härav kan permeabilitetsvärdena K_r och K_z samt den ekvivalenta sprickradien r_f beräknas. Dessa värden framgår av tabell 7. Om man antar att det dominerande spricksystemet i detta fall är horisontellt representerar K_r permeabiliteten i horisontell led och K_z den vertikala permeabiliteten för akviferen samt r_f radien för sprickan som antas genomskära pumpbrunnen. Analys har gjorts med såväl tid—avsänkings- som tid—stignings-data, se diagrammen 8 och 9.

En sammanställning av samtliga beräkningar enligt de olika metoderna redovisas i tabell 7. Värdena på de hydrauliska parametrarna måste ses som approximativa medelvärden för akviferen som helhet, innefattande alla ingående bergartsled.

TABELL 7. Sammanställning av hydrauliska parametrar beräknade enligt olika metoder vid Odensfors, Linköping.
Hydraulic parameters calculated according to different methods at Odensfors, Linköping.

Kanalmodellen med läckage									
s_w (m)	$Q \cdot 10^{-3}$ (m^3/s)	B (m)	$T \cdot 10^{-4}$ (m^2/s)	$TB \cdot 10^{-9}$ (m^3/s)	$S \cdot 10^{-4}$	$SB \cdot 10^{-2}$ (m)	E (m)	$F'/m' \cdot 10^{-9}$ s^{-1}	$BF'/m \cdot 10^{-7}$ (m/s)
6.7	1.0	50	8.5	4.3	4.4	2.2	595	2.4	1.2
Modellen för sprickiga akviferer									
tid — avsänkning			tid — stigning						
$K_r \cdot 10^{-6}$ (m/s)	$K_z \cdot 10^{-9}$ (m/s)	r_f (m)	$K_r \cdot 10^{-6}$ (m/s)	$K_z \cdot 10^{-9}$ (m/s)	r_f (m)				
1.4	2.8	89	1.6	1.7	93				

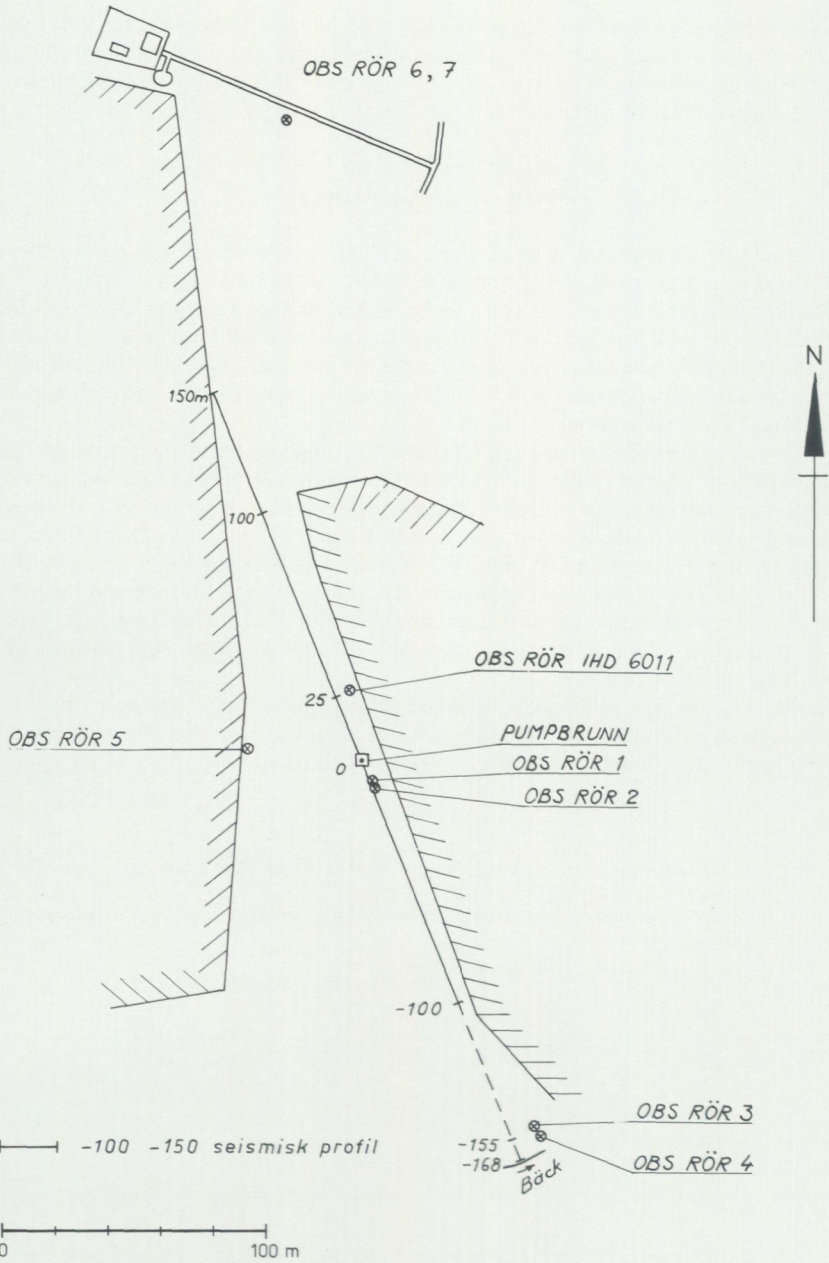


Fig. 19. Karta över undersökningsområdet vid Ljungstorp.
 Map of the investigation area at Ljungstorp.

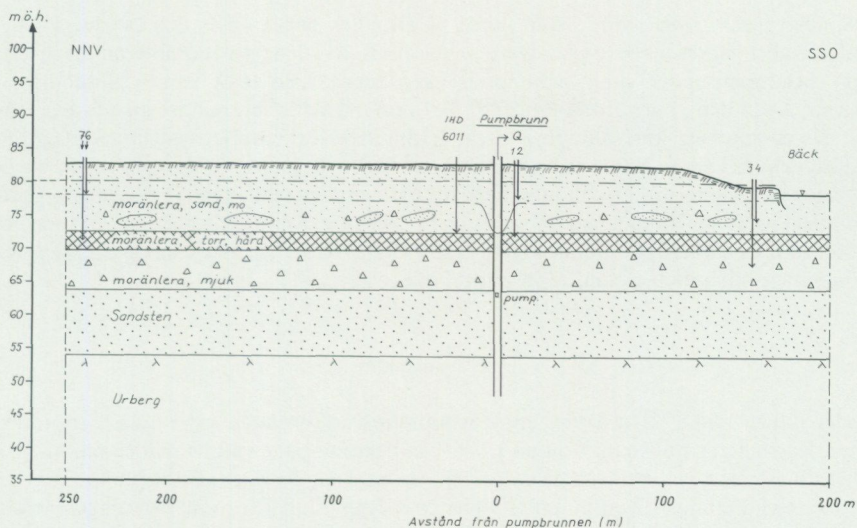


Fig. 20. Profil genom Ljungstorsområdet.
Profile of the Ljungstorp area.

Sandstensakvifer täckt av jordlager — fall 1

Lokalen Ljungstorp är belägen ca 4 km nordost om Skänninge. Borrningen är gjord i ett flackt moränleraområde som sluttar ned mot ett mindre vattendrag, se fig. 19. Markytan intill brunnen ligger ca 83 m ö.h.

Brunnen utfördes under maj månad 1975 med sänkborrhämmare. Den har ett totaldjup av 36 m och foderrör av stål genom jordlagren till ett djup av 19 m. Foderrörens diameter är 135 mm. Dessutom har tätning med cement utförts i övergången mellan jordlagren och översta delen av sandstenen ned till 24 m. Resterande del av brunnen är öppen och har borrats med mindre dimension, diameter 112 mm. Enligt brunnsprotokollet är lagerföljden i brunnen:

Djup (m)

0 — ca 1	Lerig mo
ca 1 — 10	Moränlera med sand- och molinser
10 — 12.5	Moränlera, hård
12.5 — 18	Moränlera, mjuk
18 — 28	Sandsten
28 — 36	Urberg

Det är således bara från sandstenens understa 4 m som vattenflödet till brunnen sker. För att bestämma lagerföljden inom undersökningsområdet genomfördes en seismisk undersökning längs en profil vars utsträckning framgår av fig. 19. Enligt resultaten från denna undersökning jämte borrningar kan ovanstående lagerföljdstyp generaliseras till att gälla för hela undersökningsområdet, fig. 20.

Sandstensakviferen bedöms som slutet på grund av närvaron av den överlagrande moränleran. Ett begränsat övre grundvattenmagasin finns i den övre moränleran innehållande sand- och molinser och vid provpumpning sker läckage från detta magasin till sandstensakviferen. Även den undre moränleran (10 — 18 m) innehåller ett mindre grundvattenmagasin. Detta magasin står sålunda i direkt hydraulisk förbindelse med huvudmagasinet i sandstenen. Eftersom brunnen är försedd med foderrör genom jordlagren till en bit ned i sandstenen kommer vid provpumpningen att induceras en nedåtgående vattentransport genom hela jordlagerföljden ned till sandstenen. Man får även räkna med ett visst vattentillskott från det underliggande urberget, vars översta del i vissa fall kan vara uppsprucket. Längre ned blir urberget som regel nästan impermeabelt.

Provpumpning

Under juli månad 1975 utfördes en provpumpning av brunnen vid Ljungstorp under 14 dygn. Kapaciteten hölls konstant på 1 l/s. Det bortpumpade vattnet leddes genom brandslang till en mindre å, belägen på ca 200 m avstånd från brunnen. Efter pumpningens slut mättes återhämtningen kontinuerligt under ca 8 dygn. Under förundersökningen nedrevs totalt 8 st tvåtumsrör med filterspets för att användas som observationsrör under provpumpningen. Observationsrören placerades normalt två och två invid varandra, varvid med det ena avsågs att registrera förändringarna i det övre grundvattenmagasinet i moränleran och det andra i den undre pumpade akviferen. På grund av tekniska svårigheter vid rödrivningen kunde dock de senare rören ej drivas längre än 10 — 12 m, dvs. till den hårda moränleran. Observationsrörens läge framgår av fig. 19 och 20 samt övriga data av nedanstående tabell.

TABELL 8. Provpumpning vid Ljungstorp, Skänninge.
Test pumping at Ljungstorp, Skänninge.

Obs-rör	Avst. från pumpbrunn r (m)	Höjd ö.h. r.ö.k. h (m)	Totaldjup m u. m.y. d (m)	G.v.y. h.ö.h. h (m)	Total avsänkning s (m)
1	10	83.63	10,8	80.26	3.31
2	11	83.63	5.0	80.33	1.41
3	154	80.83	11.8	80.07	2.51
4	154	80.70	5.0	78.88	(0.25)
5	47	83.87	9.5	80.34	2.85
6011	25	-	10.0	-	3.34
6	245	83.83	4.4	81.29	0.48
7	245	83.80	11.2	80.26	2.08

Anm. Avståndet från röröverkant (r.ö.k.) till markytan (m.y.) är ca 1.20 m vid samtliga observationsrör.

Grundvattennivån i de grunda observationsrören varierade beroende på olika neddrivningsdjup i den övre moränleran, se tabell 8. Detta kan förmodas bero på att lokala, slutna förhållanden skapas genom närvaron av sand- och molinser i den övre moränleran. I observationsrör 3 är grundvattnet artesiskt. Den egentliga akviferen utgörs av sandstenen som får ett visst tillskott av vatten från den övre och undre moränleran samt från urbergets

översta del. Att döma av den stora avsänkning i observationsrören är dock magasinen i moränleran mycket små. Avsänkning i de grunda observationsrören tyder på att en viss magasinförändring skett i den övre moränleran.

Sänkningstrattens utseenden efter 14 dagars pumpning framgår av fig. 20. Något inläckage från vattendraget i söder tycks inte ha skett på grund av att det rinner fram i postglacial styv lera vilken utgör en tät gräns. Utvärderingen av de hydrogeologiska parametrarna har gjorts för icke stationära förhållanden dels enligt Jacobs extrapolationsmetod (Walton 1970) med såväl avsänkings- som återhämtningsdata, dels enligt Theis-Waltons metod (Walton 1970) med avsänkingsdata (diagram 1 — 5, 7). Eftersom avsänkning vid provpumpningens slutskede var starkt reducerad på grund av läckaget har även Jacobs typkurvetmetod för stationära förhållanden (Walton 1970) prövats (diagram 6).

Beräkningarna av ovanstående parametrar har utförts dels för pumpbrunnen, dels för de djupa observationsrören 1, 3, 5, 6011 samt nr 7. Som en förenkling har härvid antagits att avsänkning i dessa observationsrör ungefärligen följer samma förlopp som om de vore nedförda ända ner till sandstensakviferen. Detta antagande visar sig stämma ganska väl vid beräkningen av transmissiviteten. De beräknade transmissivitetsvärdena måste dock tolkas som medelvärden för sandstenen och morän-(leran) tillsammans eftersom dessa lager bildar ett samverkande akvifersystem. Detta gäller även i beräkningen av magasinsefficienten där ett sammansatt värde erhålls i varierande proportioner dels från det övre öppna magasinet, S_y , dels från det slutna magasinet. Samma sak gäller vid beräkningen av läckagekoefficienten P'/m' . För fullständighetens skull har dock dessa värden medtagits i tabell 9.

Vidare har en uppskattning av de hydrogeologiska storheterna gjorts på basis av den specifika kapaciteten i den pumpade brunnen. Denna uppskattning har utförts dels enligt Jetels metod (Jetel 1967), dels ur nomogram enligt Jacobs typkurvetmetod för stationära förhållanden.

TABELL 9. Sammanställning av hydrauliska parametrar beräknade enligt olika metoder vid Ljungstorp, Skänninge.
Hydraulic parameters calculated according to different methods at Ljungstorp, Skänninge.

T=K·m m=10 m	Transmissivitet · 10 ⁻⁴ och permeabilitet · 10 ⁻⁵ m/s						Magasinskoefficient · 10 ⁻⁴			P' / m' · 10 ⁻⁹ s ⁻¹		
	avsänkning		återhämtning		Specifik kapacitet	avsänkning		återhämtning		avsänkning		
	tid	avstånd	tid	avstånd		tid	avstånd	tid	avstånd	tid	avstånd	
Diagram	1.2	3.4	5	6	1.7		2	4	7	4	6	
Plot	semilog	log	semilog	log	semilog	nomogram	semilog	log	semilog	log	log	
Pumpbrunn	0.9	1.0	-	-	0.9	2.2	2.3	-	-	-	-	
Obs. avstånd brunn	Jacob	Theis- Walton	Jacob	Jacob	Jacob	Jetel	Jacob	Jacob	Theis- Walton	Jacob	Theis- Walton	Jacob
r (m)												
1	10	1.0	1.7	↑	↑	1.2		230	360	260	29.0	↑
6011	25	1.2	0.7	↑	↑	-		28	12	-	1.0	↑
5	47	1.2	1.0	3.0	2.3	1.4		16	14	14	7.0	0.02
3	154	1.4	1.0	↓	↓	1.5		1.2	1.3	1.7	0.8	↓
7	245	1.3	1.2	↓	↓	1.5		1.6	2.0	1.9	0.03	↓
Medelvärde		1.2	0.9	3.0	2.3	1.3	2.2	2.3				
Repr. medelvärde		← 1.7 →				← 2.3 →						

Resultaten av samtliga beräkningar framgår av tabell 9. Värdena måste betraktas som osäkra på grund av observationsrörens otillräckliga djup, men de olika metoderna visar relativt god överensstämmelse vid bestämningen av transmissiviteten. Som påpekats ovan representerar värdena på de hydrauliska parametrarna i första hand den sammansatta akviferen av sandsten och jordlager.

Sandstensakvifer täckt av jordlager — fall 2

Lokalen Bränninge är belägen ca 7 km nordväst om Linköping. Vid denna lokal finns två närbelägna brunnar i sandsten. Markytan ligger där ca 40 m ö.h.

Brunnarna vid Bränninge utfördes år 1943 på ett inbördes avstånd av ca 1 m. Brunnen, i vilken provpumpningen skedde, har ett totaldjup av 24.5 m och har borrats med 148 mm diameter. Den andra brunnen är 23.5 m djup och med diametern 113 m. I bägge fallen antas foderrören nå ned i sandstenen. Lagerföljd i brunnen enligt brunnsprotokollet:

Djup (m)

0 — 3.5	Lera
3.5 — 7.0	Morän
7.0 — 24.5	Sandsten
> 24.5	Urberg

Sandstensakviferen betraktas som slutet på grund av det täckande lerlagret. Eftersom moränen bedömts som relativt grov, kan ett stort läckage från detta lager förväntas till sandstenen. Detta innebär att det i praktiken rör sig om en sammansatt akvifer med vattentillskott både från moränen och sandstenen.

Provpumpning

Under september 1975 utfördes en provpumpning i den djupare brunnen med ca 3 dygns varaktighet. Kapaciteten hölls konstant på 3.4 l/s och det uppfordrade vattnet avleddes direkt till ett närbeläget dike. Någon återinfiltration bedömdes ej kunna ske. Under pumpningen gjordes även noggranna vattenståndsobservationer i den närbelägna brunnen samt kontroller av avsänkningen i omgivande grävda brunnar.

Vid pumpningens slutskede rädde i det närmaste stationära förhållanden i pumpbrunnen på grund av läckaget, se diagrammen 11 och 12. Som ett första försök att beräkna transmissiviteten har Jacobs extrapolationsmetod utnyttjats på den tidiga delen av tid—avsänkingskurvan samt Theis-Waltons metod.

Dessutom har beräkningar baserade på den specifika kapaciteten utförts, dels enligt Jeltels metod, dels ur nomogram för stationära förhållanden. Avsänkningen i observationsbrunnen blev i stort sett identisk med den i pumpbrunnen på grund av det nära läget. Någon tillförlitlig beräkning av magasincoefficientsen kan därför ej göras med de konventionella metoderna.

Den tidiga räta linjen i det logaritmiska tid—avsänkingsdiagrammet kan tyda på att akviferen är sprickig. Någon inpassning med typkurvorna för sprickmodellen enligt Gringarten & Witherspoon är emellertid ej möjlig. Som ett andra försök att bestämma de hydrogeologiska storheterna har därför en approximativ asymptotberäkning utförts enligt kanalmodellen med läckage för stationära förhållanden (Gustafson 1978), analogt med för-

farandet vid utvärderingen av propvpumpningen i Odenfors. Medelvärde på transmissivitet ur de tidigare försöken har bestämts till $T = 2.0 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. Om kanalbredden B antas vara 100 m, kan läckagefaktorn E sedan beräknas enligt (3). Avsänkningen i pumpbrunnen uppgick till 2.19 m vid slutskedet av pumpningen. Vidare kan kvoten P'/m' samt magasin-koefficienten S uppskattas. Samtliga resultat framgår av tabell 10. De i denna tabell redovisade värdena på de hydrogeologiska parametrarna får ses som medelvärden, representerande den sammansatta akviferen av sandsten och morän. Att de båda formationerna samverkar, verifieras av det höga beräknade värdet på läckagekoefficienten P'/m' och att det skedde en relativt stor avsänkning i intilliggande grävda brunnar i moränen under propvpumpningen.

TABELL 10. Sammanställning av hydrauliska parametrar beräknade enligt olika metoder vid Bränninge, Linköping.
Hydraulic parameters calculated according to different methods at Bränninge, Linköping.

Jacob	Jetel	Nomogram (Jacob)	Kanalmodellen med läckage							
Transmissivitet $T \cdot 10^{-3}$ (m^2/s)			B (m)	$T \cdot 10^{-3}$ (m^2/s)	$TB \cdot 10^{-1}$ (m^3/s)	$S \cdot 10^{-4}$	$SB \cdot 10^{-2}$ (m)	E (m)	$P'/m' \cdot 10^{-8}$	$BP'/m' \cdot 10^{-6}$
1.6	2.3	2.1	100	2.0	2.0	5.7	5.7	256	3.1	3.1

Sandstensakvifer täckt av kalksten och skiffer — fall 1

Vid lokalen Karlsfrid, ca 2 km väster om Klockrike, finns hela den för undersökningsområdet normala sedimentära lagerföljden representerad. Den relativt ringa grundvattenmängd som kan tas ut på denna plats tyder på att bergarterna är homogena och relativt sprickfria. Markytan intill brunnen ligger ca 87 m ö. h.

Borrningen vid Karlsfrid utfördes under juni månad 1975 med s.k. linstötbormmaskin och genomträngde hela den sedimentära lagerföljden och avslutades ca 2.5 m nere i urberget. Totaldjupet är 112.5 m. Brunnen är försedd med dubbla foderrör, bestående dels av genom jordlagren ned till 18 m djup under markytan galvaniserade järnrör (diameter 110 mm), dels av rör med mindre dimension (diameter 75 mm) inuti de förra ned till 85 m djup. Dessa inre rör når ca 1 m ned i sandstensakviferen. Resten av brunnen är öppen. För att er-hålla vatten enbart från sandstensakviferen samt för att utestänga gas härrörande från alunskiffern tätades med cement mellan foderrören och borrhvagen i övergångszonen skiffer/sandsten på nivån 75 — 84 m. Lagerföljd enligt brunnsprotokollet:

Djup (m)

0 — 10	Mellansand—grusig sand
10 — 15	Morän
15 — 17	Mo
17 — 56	Kalksten
56 — 84	Skiffer
84 — 86	Glaukonitsandsten
86 — 110	Sandsten
110 — 112.5 +	Urberg

Sandstenen betraktas som den egentliga akviferen. Vid pumpning induceras ett läckage från det övre grundvattenmagasinet i jordlagren genom de mindre permeabla kalkstens- och skifferlagren ned till sandstensakviferen.

Provpumpningar

Korttidspumpningar under brunnens utförande

Under borrningsskedet utfördes flera korta provpumpningar, först i kalkstenen sedan vid övergången skiffer/sandsten och slutligen vid övergången sandsten/urberg. Härigenom kan vattentillskottet från respektive bergarter uppskattas. Provpumpningarna utfördes med hjälp av den befintliga borrrustningen genom kolvpump ("kanna"). Resultaten av korttidspumpningarna framgår av tabell 11.

TABELL 11. Korttidspumpningar vid Karlsfrid, Klockrike.
Short-time pumping tests at Karlsfrid, Klockrike.

Borrddjup (m)	Pumpdjup (m)	Pumptid (h)	Kapacitet Q (l/s)	Avsänkning s_w (m)	$Q/s_w \cdot 10^{-3}$ (l/s/m)	Akvifer/ Bergart
42	41	6	0.07	41	1.707	kst
84	60	6	0.31	60	5.167	kst + sk
112.5	60	6	0.83	60	13.83	kst + sk + sst

kst = kalksten sk = skiffer sst = sandsten

Anm. Vid dessa provpumpningar fanns således endast det yttre foderröret genom jordlagren. Resterande del av brunnen var öppen. Varje pumpning följdes av en återhämtningstest med ungefär samma varaktighet som pumpningen.

Eftersom ingen kontinuerlig registrering av avsänkningen som funktion av tiden kunde företas vid dessa korta pumpningar på grund av det mycket snabba avsänkingsförloppet, kan en uppskattning av de hydrogeologiska storheterna enbart ske på basis av den specifika kapaciteten i pumpbrunnen. Detta kan ske enligt Jetel (1967). Återhämtningen från respektive korttidspumpningar mättes däremot kontinuerligt, men eftersom magasinet i själva brunnen (brunnsmagasinet) är relativt stort (ca 1 000 l) i förhållande till pumpkapaciteten kan man i detta fall inte försumma detta magasin. Detta innebär att varken Jacobs eller Theis-Waltons metoder är tillämpliga.

Den första korttidspumpningen skedde vid ett borrddjup av 42 m. Då hade således 25 m kalksten genomborrats. Enligt Jetels metod erhålls enligt (8) värdena K_1 respektive T_1 som representerar kalkstenen. Den andra pumpningen skedde då borrningen nått övergången skiffer/sandsten och analogt fås K_2 och T_2 för kalksten + skiffer tillsammans. Den tredje pumpningen skedde vid övergången sandsten/urberg och ger således K_3 och T_3 för hela lagerföljden (kalksten + skiffer + sandsten). Enligt definitionen av transmissivitet

$$T = \int_0^m K(z) dz \cong K_1 m_1 + K_2 m_2 + K_3 m_3 \dots = T_1 + T_2 + T_3 \dots$$

där K_i och m_i är permeabilitet resp. mäktighet av varje enskilt lager och m är den totala mäktigheten, kan man approximativt beräkna sandstenens transmissivitet som skillnaden mellan T_3 och T_2 samt skiffrens transmissivitet som $T_2 - T_1$. Vid beräkningarna har bortsetts från eventuellt läckage eftersom pumptiderna är korta. Vidare har förhållandet R/r i (8) satts till 10^4 . Resultaten av dessa beräkningar framgår av tabell 12.

TABELL 12. Sammanställning av hydrauliska parametrar beräknade enligt olika metoder vid Karlsfrid, Klockrike.
Hydraulic parameters calculated according to different methods at Karlsfrid, Klockrike.

Korttidsprovpumpning			Långtidsprovpumpning				
T = K · m	Jetel		Jetel		Nomogram (Jacob)		
Bergart	$T \cdot 10^{-5} (m^2/s)$	$K \cdot 10^{-7} (m/s)$	$T \cdot 10^{-5} (m^2/s)$	$K \cdot 10^{-7} (m/s)$	$T \cdot 10^{-5} (m^2/s)$	$K \cdot 10^{-7} (m/s)$	$P'/m' \cdot 10^{-9} s^{-1}$ (antaget värde)
Kalksten	0.37	0.95	-	-	-	-	-
Skiffer	0.39	1.4	-	-	-	-	-
Sandsten	1.3	5.0	1.4	5.4	1.3	5.0	1.0

Långtidsprovpumpning

Efter det att brunnen hade färdigborrats och kompletterats med det inre foderröret och tätats i övergången skiffer/sandsten, gjordes en propumpning med ca 14 dygns varaktighet under augusti 1975. Vattenuppföringen skedde med en s.k. ejektorpump. För att upprätthålla ett visst konstant mottryck till denna pumpades vattnet till en hydrofor, varefter det leddes bort. På grund av akviferens stora känslighet för tryckändringar förelåg i början vissa svårigheter att hålla konstant pumpkapacitet, se diagram 10. Under större delen av pumptiden hölls emellertid kapaciteten konstant på ca 0.20 l/s. Större kapacitet kunde ej tolereras på grund av den stora avsänkningen i brunnen.

Propumpningen följdes av en återhämtningstest under ca 14 dygn. Under denna tid hade brunnen återhämtat sig nästan helt till grundvattennivån före propumpningens början.

Eftersom brunsmagasinet ej heller i detta fall kan försummas, måste beräkningarna baseras på den specifika kapaciteten i pumpbrunnen. Under propumpningen inträffade ett jämviktsläge efter ca 600 minuter, se diagram 10, kring vilket grundvattenytan pendlade under resterande del av pumpningen. Avvikelsena från jämviktsläget berodde sannolikt på mindre ändringar av pumpkapaciteten samt på lufttrycksförändringar. Avsänkningen vid jämviktsläget var ca 20.6 m. Med förhållandet $R/r = 10^4$ kan permeabiliteten beräknas ur (8) enligt Jetels metod.

Transmissiviteten erhålls sedan genom multiplikation med sandstenens mäktighet. Transmissiviteten kan även bestämmas ur nomogram enligt Jacobs metod för stationära förhållanden, där denna parameter avbildas som funktion av specifika kapaciteten för olika värden på r_w/B . Läckagefaktorn B måste härvid uppskattas. Detta kan ske genom att anta ett rimligt värde på läckagekoefficienten P'/m' och använda T-värdet som beräknats tidigare. Läckagefaktorn kan sedan beräknas genom sambandet $B^2 = T/P'/m'$. Därefter beräknas förhållandet r_w/B . Med specifika kapaciteten och r_w/B kända bestämmas sedan transmissiviteten ur nomogrammet. Vid bestämningen har antagits att $P'/m' = 10^9 (s^{-1})$.

Resultaten av propumpningarna framgår av tabell 12. De beräknade värdena visar god överensstämmelse mellan de av varandra oberoende beräkningsmetoderna.

Sandstensakvifer täckt av kalksten och skiffer — fall 2

Lokalen Mjölna ligger ca 2 km sydväst om Vadstena. Topografiskt utgörs området av slättland. Vid denna lokal finns en komplett lagerföljd av de inom området förekommande sedimentära bergarterna representerad. Markytan intill brunnen ligger ca 90 m ö.h.

Borrningen vid Mjölna utfördes i september 1975 med linstötmaskin. Brunnen genomträngde både kalkstens- och skifferformationerna och avslutades i sandstenen. Brunnen är beklädd med foderrör med dimensionen 135 mm genom jordlagret till nivån 7.76 m. Restande del av brunnen är öppen till totala djupet 79 m.

Lagerföljd enligt brunnsprotokollet:

Djup (m)

0.0 — 7.3	Lerig morän
7.3 — 21.0	Kalksten
21.0 — 41.0	Alunskiffer
41.0 — 61.3	Lerskiffer
61.3 — 63.8	Glaukonitsandsten
63.8 — 79.0 +	Sandsten

Sandstensformationen betraktas som en läckande sluten akvifer, till vilken ett mindre läckage sker uppifrån genom de relativt täta kalkstens- och skifferlagren.

Provpumpning

Under borrningsskedet gjordes dels en kort provpumpning i kalkstenen, dels en något längre pumpning efter att borrningen avslutats i sandstenen. Båda pumpningarna utfördes med den befintliga borr- och pumputrustningen ("kanna"), vars maximala pumpkapacitet var ca 2.6 l/s. Vid den senare pumpningen hade dock sannolikt ett avsevärt större vattenuttag varit möjligt. Resultaten av dessa pumpningar framgår av tabell 13.

TABELL 13. Korttidsprovpumpningar vid Mjölna, Vadstena.
Short-time pumping tests at Mjölna, Vadstena.

Borr djup (m)	Pumpdjup (m)	Pumptid (h)	Kapacitet Q (l/s)	Avsänkning s_w (m)	$Q/s_w \cdot 10^{-3}$ (l/s/m)	Akvifer/ bergart
21	19	0.5	0.12	19	6	kalksten
79	49	7.5	2.6	8.95	290	sandsten

Den längre pumpningen åtföljdes av en återhämtningstest med ca 15 timmars varaktighet. Brunnen hade då i stort sett återhämtat sig helt.

På grund av brunnens utförande (utan foderrör ned till sandstensakviferen) fås ett direkt tillskott av vatten från kalkstens- och skifferlagren. Detta tillskott är emellertid i detta fall av underordnad betydelse jämfört med sandstenens vattengivande förmåga. Om man anser att skiffern vid den aktuella lokalen har ungefär samma permeabilitet som vid lokalen Karlsfrid, se tabell 12, och antar att transmissiviteten för de olika bergartsleden

kan summeras, se föregående avsnitt, fås att vattentillskottet från kalksten och skiffer tillsammans endast utgör 5 — 10% av hela den uppumpade vattenmängden. Resterande del härrör sålunda från sandstenen.

Under pumpningens slutskede rådde icke-stationära förhållanden. Beräkningarna av de hydrauliska parametrarna har gjorts enligt Jacobs och Theis-Waltons metoder för icke-jämviktsförhållanden, se diagrammen 13 och 14 samt ur specifika kapaciteten enligt nomogram för icke-stationär strömning, konstruerat av Haman & Ambo (1973), samt med Jetels metod. För att få en uppfattning om kalkstens transmissivitet kan Jetels metod användas med data från den kortare pumpningen med $R/r = 10^4$. Resultatet av denna beräkning framgår av tabell 14.

Transmissiviteten för sandstenen har beräknats enligt ovan nämnda metoder med data från den längre provpumpningen. Härvid har förutsatts att brunnen utnyttjar sandstens fulla mäktighet. I den aktuella borrningen saknas dock ca 5 m av sandstenen. Vid bestämningen av T ur nomogram har antagits $S = 2 \cdot 10^{-4}$. Resultaten framgår av tabell 14.

TABELL 14. Sammanställning av hydrauliska parametrar beräknade enligt olika metoder vid Mjölna, Vadstena.
Hydraulic parameters calculated according to different methods at Mjölna, Vadstena.

T = K · m	Transmissivitet · 10 ⁻⁴ ($\frac{2}{m/s}$)				Permeabilitet · 10 ⁻⁶ (m/s)			
Akvifer/ Bergart	Jacob	Theis	Jetel	Haman	Jacob	Theis	Jetel	Haman
Kalksten	-	-	0.090	-	-	-	0.66	-
Sandsten	1.3	1.3	-	3.3	7.3	7.3	-	19
Sandsten medelv.	← 2.0 →				← 11 →			

Sandstensakvifer täckt av skiffer — fall 1

Lokalen Myra är belägen ca 11 km nordväst om Linköping. Den sedimentära lagerföljden är där reducerad och består av skiffer och sandsten. Markytan intill brunnen ligger ca 71 m ö.h.

Borrningen vid Myra utfördes år 1974 med linstötmaskin. Borrhålet genomtränger skiffer- och sandstenslagren och avslutas i urberget. Totala djupet är 57.7 m. I brunnen finns 26 m foderrör med en diameter av 110 mm genom jordlagret och skiffern. Resterande del är öppen. Lagerföljd enligt brunnsprotokollet:

Djup (m)

0 — 11.0	Jord
11.0 — 14.5	Alunskiffer
14.5 — 25.0	Lerskiffer
25.0 — 26.5	Grön lera
26.5 — 30.0	Sandsten, ren
30.0 — 45.0	Sandsten, lerig
45.0 — 48.5	Sandsten, ren
48.5 — 57.7 +	Urberg

Eftersom den aktuella brunnen är försedd med foderrör ned till sandstensakviferen, bör man i detta fall få ett tämligen riktigt mått på sandstensens verkliga hydrauliska egenskaper ur provpumpningen. Den största vattenmängden bedöms komma från den undre delen av sandstenen. Med tiden sker dock sannolikt ett visst läckage ovanifrån. Tillskott i mindre omfattning sker möjligen även från det underliggande urberget. Sandstensformationen kan alltså betraktas som en läckande sluten akvifer.

Provpumpning

En stegprovpumpning utfördes med stegvis ökad kapacitet och med varje steg omfattande 1 timme. Resultatet framgår av tabell 15.

TABELL 15. Stegprovpumpning vid Myra, Linköping.
Step drawdown test at Myra, Linköping.

Steg	Δs_w (m)	s_w (m)	$Q \cdot 10^{-3}$ (m ³ /s)	s_w/Q (s/m ²)
1	0.55	0.55	0.47	1173
2	0.51	1.06	0.79	1343
3	0.43	1.49	1.00	1490

Ur stegprovpumpningen kan formationsfaktorn B och brunnsfaktorn C samt exponenten för turbulent strömning P bestämmas, se formel 9 i formelbilagan, s. 00. Dessa parametrar har dels bestämts grafiskt med Jacobs metod för brunnar (Andersen & Haman 1970), dels enligt en speciell dator-optimeringsmetod som bygger på minsta kvadratanpassning (Labadie & Helweg 1975). Vid den senare metoden erhålls värdena av B, C och P samt minsta kvadratanpassningsfelet. Vid utvärdering enligt Jacobs metod för brunnar antas att exponenten $P = 2$. Med konstanterna B och C samt exponenten P kända, kan avsänkningen efter varje steg åskådliggöras grafiskt som funktion av kapaciteten enligt (9), se diagram 17. Dessutom kan sandstensens transmissivitet uppskattas ur avsänkingsdata från det första steget enligt Jacobs extrapolationsmetod, se diagram 15.

Samtliga resultat framgår av tabell 16. Enligt minsta kvadratanpassningsmetoden fås ett något högre värde på exponenten P jämfört med Jacobs metod, vilket överensstämmer väl med resultaten av upphovsmännens undersökningar. Beräkningarna enligt Jacobs metod framgår av diagram 16.

TABELL 16. Sammanställning av resultat från Myra, Linköping och jämförelse mellan uppmätt och beräknad avsänkning enligt olika metoder (avrundade värden).
Compilation of results from Myra, Linköping and comparison between measured and calculated drawdown according to different methods (rounded off values).

	Jacob		Uppmätta värden		Jacob			Minsta kvadratmetoden				
T=K·m	$T \cdot 10^{-4}$	$K \cdot 10^{-5}$	s_w	$Q \cdot 10^{-3}$	$B=0,9 \cdot 10^3$	$C=5,8 \cdot 10^5$	P	s_w (m)	$B=1,057 \cdot 10^3$	$C=7,336 \cdot 10^7$	P	s_w (m)
Steg	(m^2/s)	(m/s)	(m)	(m^3/s)	BQ (m)	CQ^2 (m)			BQ (m)	CQ^2 (m)		
1	4,3	2,0	0,55	0,47	0,42	0,13	↑	0,55	0,50	0,05	↑	0,55
2	-	-	1,06	0,79	0,71	0,37	2,0	1,08	0,23	2,74	2,74	1,06
3	-	-	1,49	1,00	0,90	0,60	↓	1,50	1,06	0,43	↓	1,49

Sandstensakvifer täckt av skiffer — fall 2

Lokalen Vreta ligger ca 2 km norr om Skänninge. Den sedimentära lagerföljden är där ytterligare reducerad och sandstenen överlagras av ett tunt skifferlager under jordlagret. Märkytan intill brunnen ligger ca 96 m ö.h.

Borrningen utfördes under år 1975 med linstötmaskin. Den genomtränger skiffern och avslutas i sandstenen. Totala djupet är 23 m och i brunnen finns 17 m foderrör med en diameter av 115 mm genom jord- och skifferlagren. Lagerföljd enligt brunnprotokollet:

Djup (m)

0 — 14	Jord
14 — 15,5	Lerskiffer
15,5 — 16	Glaukonitskiffer
16 — 23 +	Sandsten

Brunnen vid Vreta representerar således tryckytan i den övre delen av sandstenen då ju borrningen ej når djupare. Även i detta fall fås ett visst läckage efter viss tids pumpning. Sandstenen betraktas som en läckande sluten akvifer. Skifferlagrets utbredning är emellertid begränsat vid denna lokal och mera öppna förhållanden kan förekomma inom ett relativt kort avstånd från brunnen, se Pl. 1. Skiffers mäktighet och utbredning vid denna lokal är egentligen alltför liten för att de ideala förhållandena för en läckande sluten akvifer skall vara uppfyllda.

Provpumpning

Under maj 1975 utfördes en stegprov-pumpning vid Vreta. Pumpningen utfördes med 4 steg och med en steglängd av 1 timme. Under 4:e steget inträffade dock ett pumpstopp och därför har vid beräkningarna endast medtagits de tre första stegen. Avsänkning och kapacitet framgår av tabell 17.

TABELL 17. Stegprov-pumpning vid Vreta, Skänninge.
Step drawdown test at Vreta, Skänninge.

Steg	Δs_w (m)	s_w (m)	$Q \cdot 10^{-3}$ (m ³ /s)	s_w/Q (s/m ²)
1	2.10	2.10	0.13	16154
2	6.24	8.34	0.48	17373
3	1.45	9.79	0.55	17800
4	(6.98)	(16.77)	0.79	-

Ett preliminärt värde på sandstensens transmissivitet erhålls ur stegprov-pumpningens första steg, se diagram 18. Dessutom bestäms parametrarna B, C och exponenten P enligt Jacobs metod och med minsta kvadratmetoden på samma sätt som vid föregående stegprov-pumpning. Resultaten framgår av diagram 19.

Transmissiviteten kan även beräknas ur återhämtningsdata enligt en metod beskriven av Harrill (1970). Härvid har avsänkningen i brunnen efter fjärde steget extrapolerats på grund av pumphaveriet. Förhållandet mellan den residuala avsänkningen s' och t/t' visas i ett semilogaritmiskt diagram, se diagram 20. Vid beräkningen av transmissiviteten har förutsatts att brunnen utnyttjar sandstensens fulla mäktighet. Resultaten av samtliga beräkningar framgår av tabell 18.

TABELL 18. Sammanställning av resultat från Vreta, Skänninge och jämförelse mellan uppmätt och beräknad avsänkning enligt olika metoder.
Compilation of results from Vreta, Skänninge and comparison between measured and calculated drawdown according to different methods.

	Jacob tid - avsänkning		Harrill tid - stigning		Uppmätta värden		Jacob			Minsta kvadratmetoden				
T=K·m	$T \cdot 10^{-5}$	$K \cdot 10^{-6}$	$T \cdot 10^{-5}$	$K \cdot 10^{-6}$	s_w	$Q \cdot 10^{-3}$	$B=1.566 \cdot 10^4$	$C=3.80 \cdot 10^6$	P	s_w	$B=1.614 \cdot 10^4$	$C=5.656 \cdot 10^8$	P	s_w
Steg	(m ² /s)	(m/s)	(m ² /s)	(m/s)	(m)	(m ³ /s)	BQ (m)	CQ ² (m)		(m)	BQ (m)	CQ ^P (m)		(m)
1	3.9	5.6	1.8	2.6	2.10	0.13	2.04	0.06	↑	2.10	2.10	0.02	↑	2.12
2	-	-	-	-	8.34	0.48	7.54	0.86	2.0	8.40	7.75	0.63	2.70	8.38
3	-	-	-	-	9.79	0.55	8.64	1.13	↓	9.77	8.88	0.91	↓	9.79

Kalkstensakvifer täckt av jordlager

Lokalen Aska är belägen ca 1 km nordväst om Fivelstad. Kalkstenen har visat sig ge en betydande mängd vatten inom detta område rimligtvis beroende på en relativt hög sprickighet. Markytan ligger på ca 115 m ö.h.

Borrningen utfördes år 1974 med linstötmaskin. Den avslutas i kalkstenen och har ett totaldjup av 41.5 m. I brunnen finns 26.5 m foderrör med dimensionen 110 mm i diameter

till 1.5 m ned i kalkstenen, vars översta del är uppsprucken. Lagerföljd enligt brunnsprotokollet:

Djup (m)

0 — 11	Grovsediment
11 — 25	Morän
25 — 39	Röd kalksten, homogen
39 — 41.5	Grågrön kalksten

Brunnen representerar vid denna lokal kalkstenens tryckyta. Före pumpningen låg denna yta ca 0.5 m under grundvattenytan i jordlagren.

Provpumpning

I augusti 1974 utfördes en stegprovpumpning med 3 steg och med steglängden 1 timme. Resultatet framgår av tabell 19.

TABELL 19. Stegprovpumpning vid Aska, Vadstena.
Step drawdown test at Aska, Vadstena.

Steg	Δs_w (m)	s_w (m)	$Q \cdot 10^{-3}$ (m ³ /s)	s_w/Q s(m ²)
1	1.18	1.18	0.52	2269
2	1.37	2.55	0.94	2713
3	1.25	3.80	1.25	3040

Ett approximativt värde på transmissiviteten erhålls ur avsänkingsdata från första steget, se diagram 21. Brunnens hydrauliska parametrar har bestämts med Jacobs metod och med minsta kvadratmetoden. Resultaten är intressanta såtillvida att optimeringsmetoden ger samma värde på exponenten P som antas vid Jacobs metod, dvs. $P = 2$. Även B- och C-värdena är praktiskt taget lika enligt båda metoderna. Resultaten framgår av diagram 22. En sammanfattning av resultaten redovisas i tabell 20.

TABELL 20. Sammanställning av resultat från Aska, Vadstena och jämförelse mellan uppmätt och beräknad avsänkning enligt olika metoder (avrundade värden).
Compilation of results from Aska, Vadstena and comparison between measured and calculated drawdown according to different methods (rounded off values).

	Jacob	Uppmätta värden		Jacob			Minsta kvadratmetoden				
T = K·m	$T \cdot 10^{-4}$	s_w	$Q \cdot 10^{-3}$	B=1.713·10 ³	C=1.056·10 ⁶	P	s_w	B=1.917·10 ³	C=1.049·10 ⁶	P	s_w
Steg	(m ² /s)	(m)	(m ³ /s)	BQ (m)	CQ ² (m)	(m)	(m)	BQ (m)	CQ ^P (m)	(m)	(m)
1	6.3	1.18	0.52	0.89	0.29	↑ 1.18		0.89	0.28	↑ 1.18	
2	-	2.55	0.94	1.62	0.94	2.0	2.55	1.62	0.93	2.00	2.55
3	-	3.80	1.25	2.15	1.66	↓ 3.81		2.15	1.64	↓ 3.79	

DIAGRAM 1. Provpumpning vid Ljungstorp. Tid — avsänkning och tid — stigning. Pumpbrunnen.
 Test pumping at Ljungstorp. Time — drawdown and time — recovery. The pumping well.

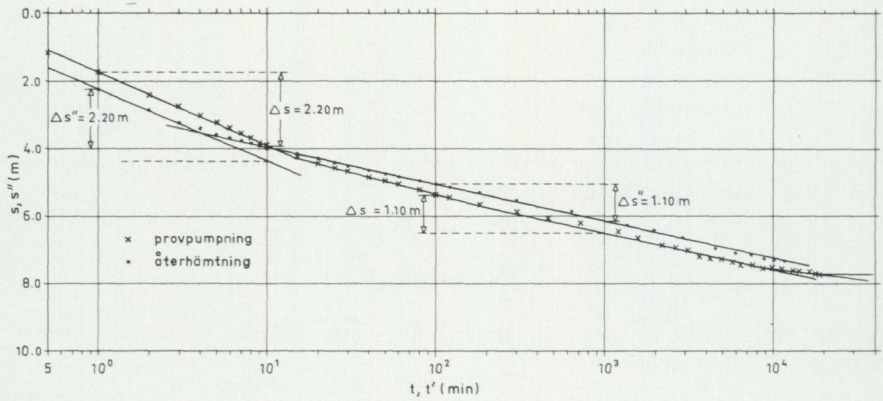


DIAGRAM 2. Provpumpning vid Ljungstorp. Tid — avsänkning. Observationsrören.
 Test pumping at Ljungstorp. Time — drawdown. The observation pipes.

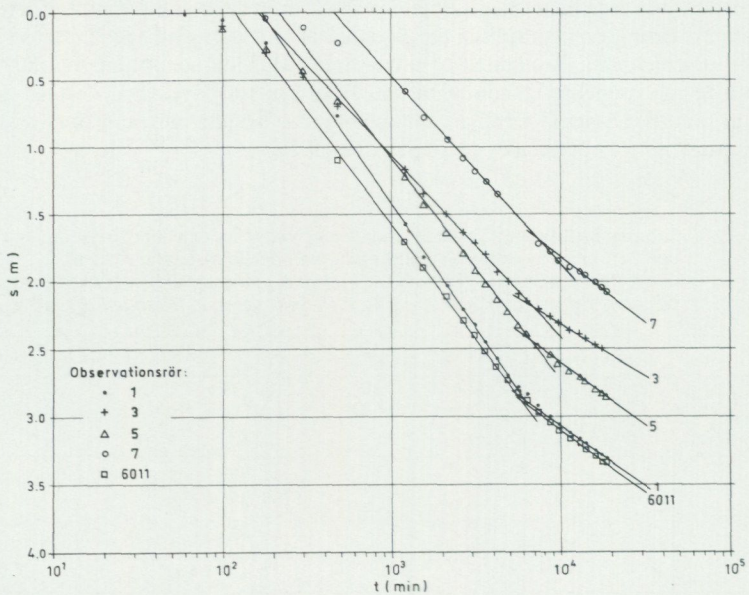


DIAGRAM 3. Provpumpning vid Ljungstorp. Tid — avsänkning. Pumpbrunnen.
Test pumping at Ljungstorp. Time — drawdown. The pumping well.

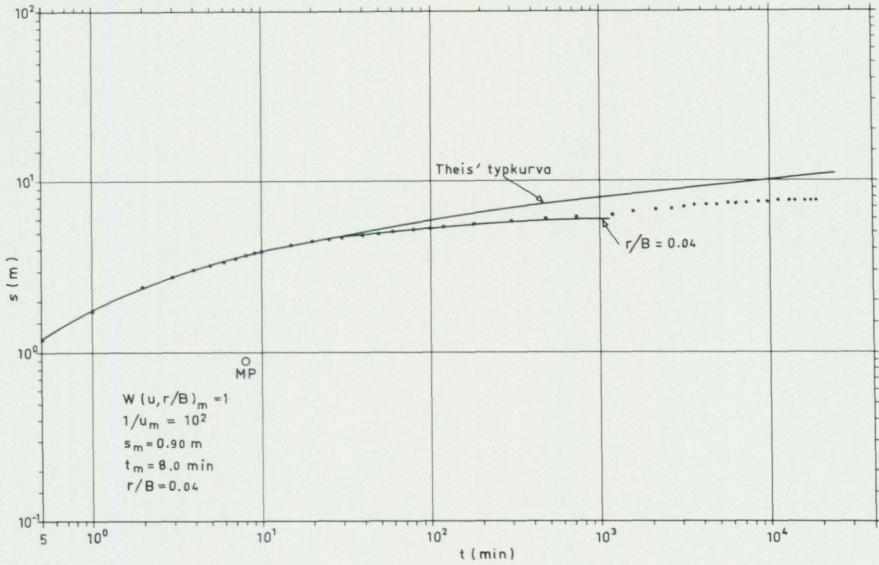


DIAGRAM 4. Provpumpning vid Ljungstorp. Tid — avsänkning. Observationsrören.
Test pumping at Ljungstorp. Time — drawdown. The observation pipes.

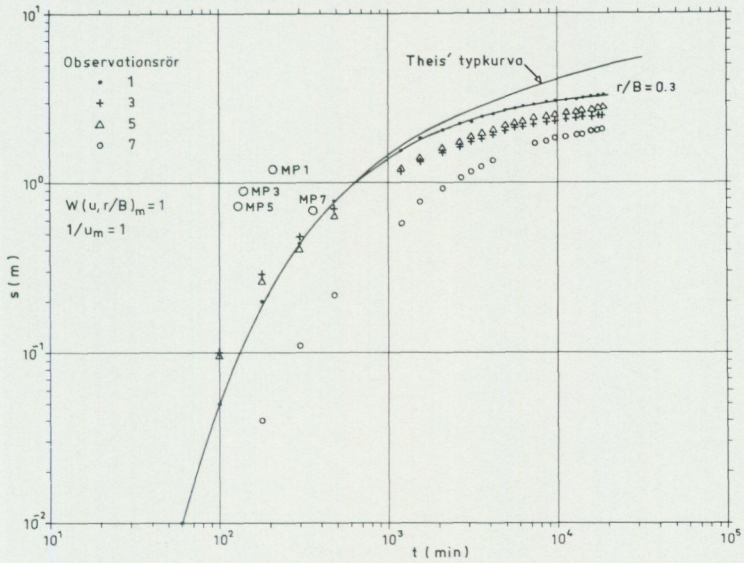


DIAGRAM 5. Provpumpning vid Ljungstorp. Avstånd — avsänkning. Observationsrören.
Test pumping at Ljungstorp. Distance — drawdown. The observation pipes.

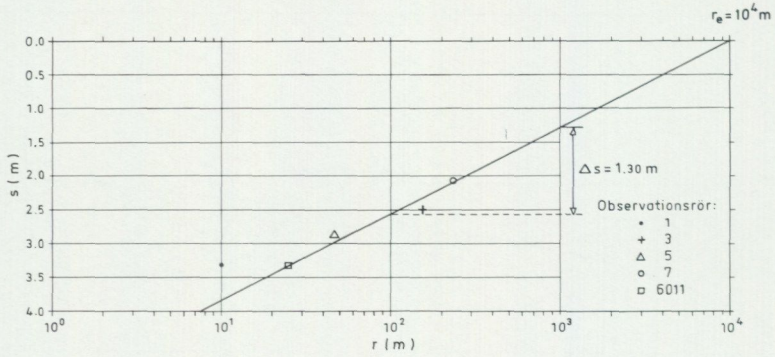


DIAGRAM 6. Provpumpning vid Ljungstorp. Avstånd — avsänkning. Observationsrören.
Test pumping at Ljungstorp. Distance — drawdown. The observation pipes.

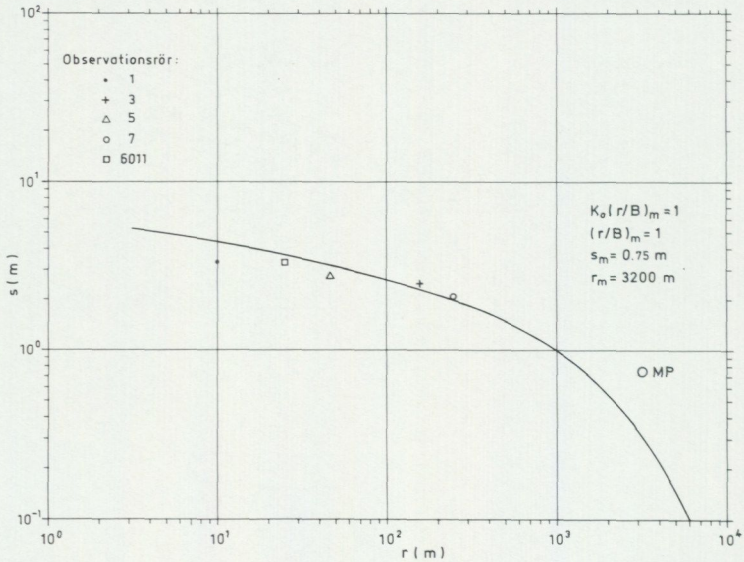


DIAGRAM 7. Provpumpning vid Ljungstorp. Tid — stigning. Observationsrören.
Test pumping at Ljungstorp. Time — recovery. The observation pipes.

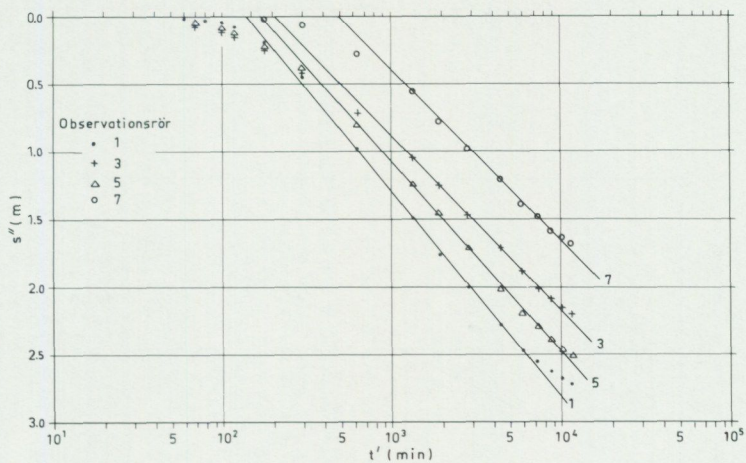


DIAGRAM 8. Provpumpning vid Odensfors. Tid — avsänkning. Pumpbrunnen.
Test pumping at Odensfors. Time — drawdown. The pumping well.

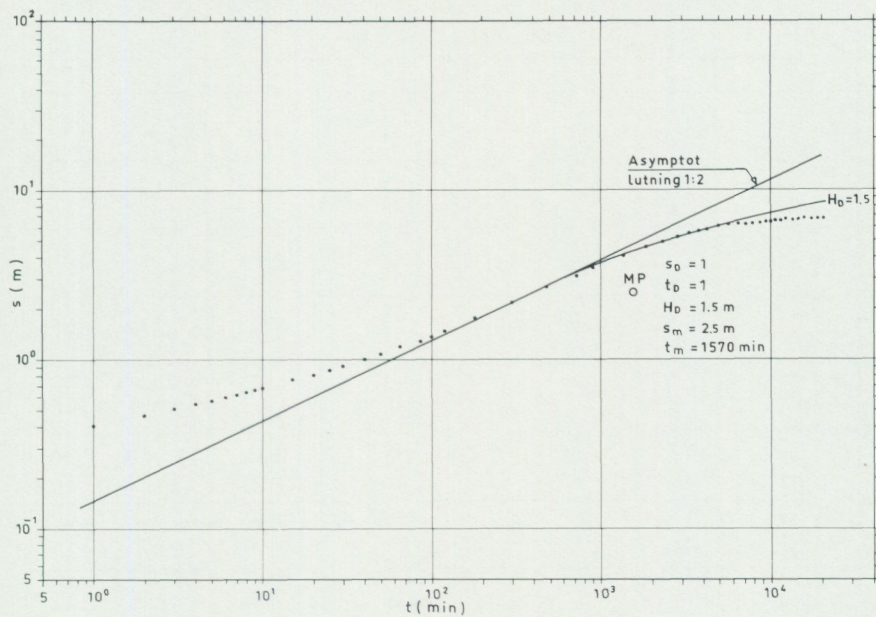


DIAGRAM 9. Provpumpning vid Odensfors. Tid — stigning. Pumpbrunnen.
 Test pumping at Odensfors. Time — recovery. The pumping well.

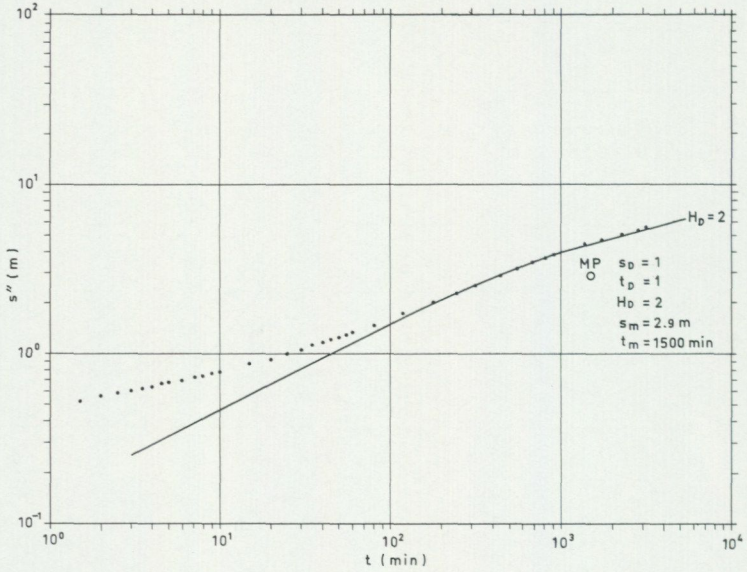


DIAGRAM 10. Provpumpning vid Karlsfrid. Tid — avsänkning. Pumpbrunnen.
 Test pumping at Karlsfrid. Time — drawdown. The pumping well.

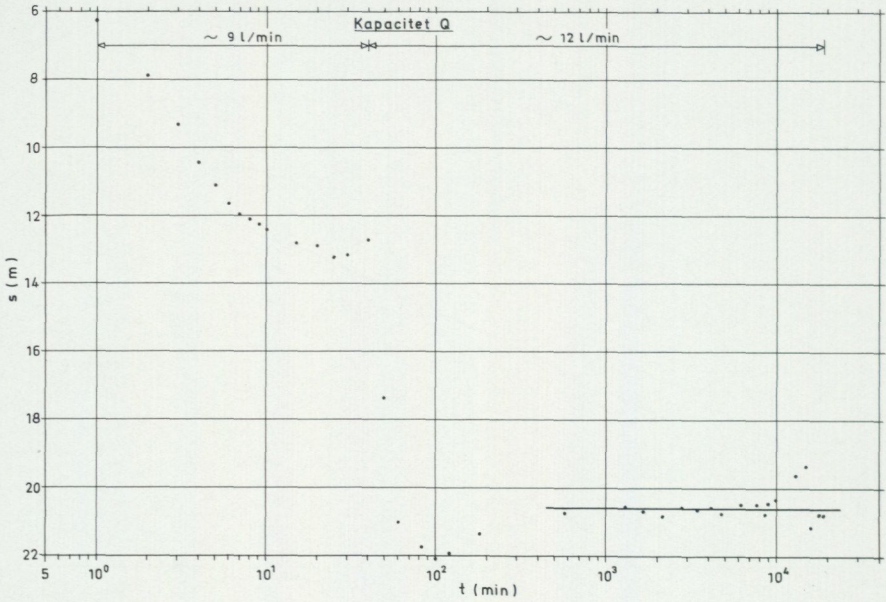


DIAGRAM 11. Provpumpning vid Bränninge. Tid — avsänkning. Pumpbrunnen.
 Test pumping at Bränninge. Time — drawdown. The pumping well.

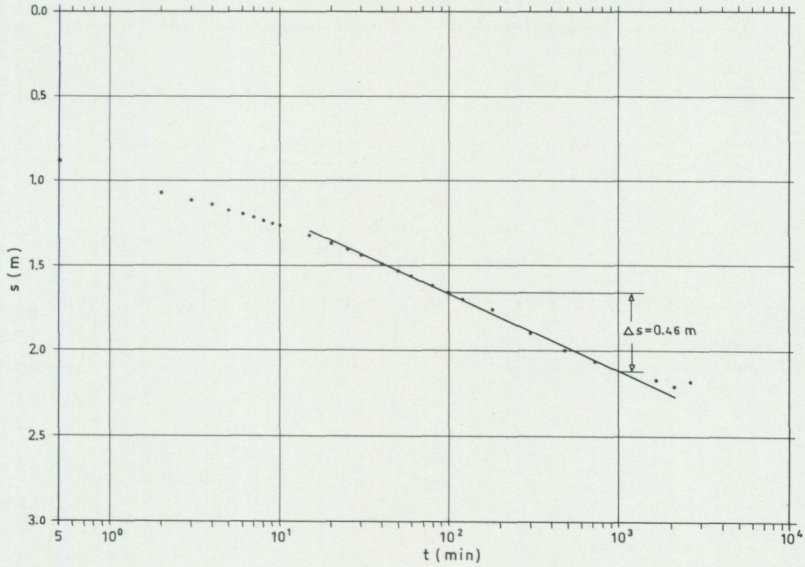


DIAGRAM 12. Provpumpning vid Bränninge. Tid — avsänkning. Pumpbrunnen.
 Test pumping at Bränninge. Time — drawdown. The pumping well.

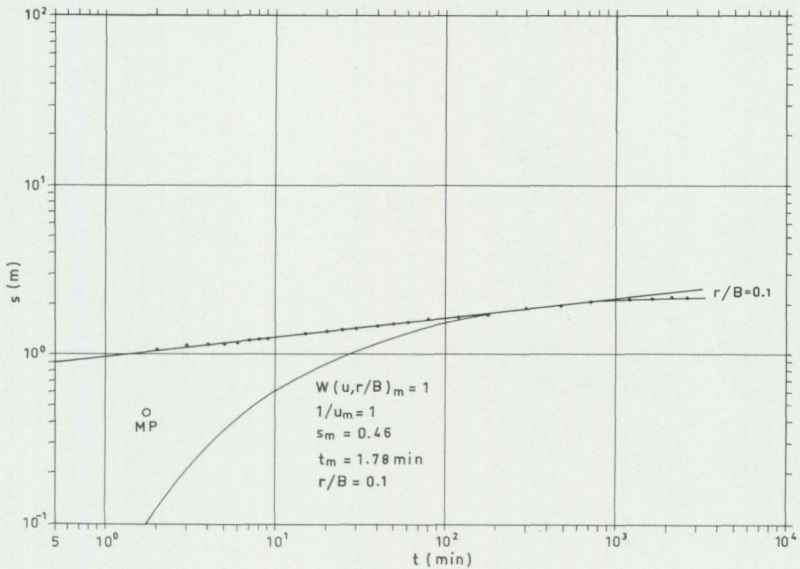


DIAGRAM 13. Provpumpning vid Mjölna. Tid — avsänkning. Pumpbrunnen.
 Test pumping at Mjölna. Time — drawdown. The pumping well.

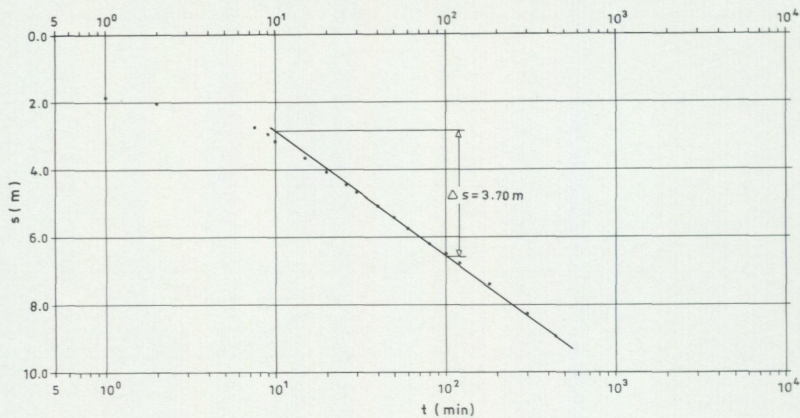


DIAGRAM 14. Provpumpning vid Mjölna. Tid — avsänkning. Pumpbrunnen.
 Test pumping at Mjölna. Time — drawdown. The pumping well.

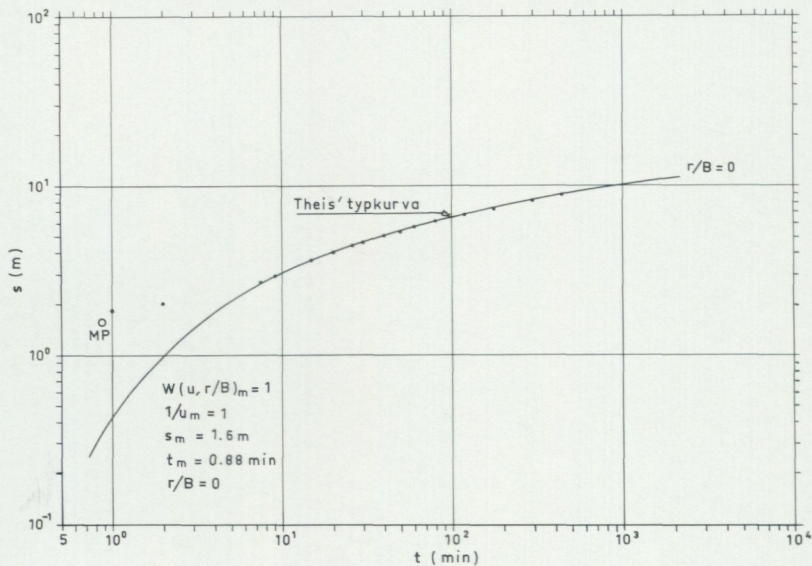


DIAGRAM 15. Stegprov-pumpning vid Myra. Tid — avsänkning. Pumpbrunnen.
Step drawdown test at Myra. Time — drawdown. The pumping well.

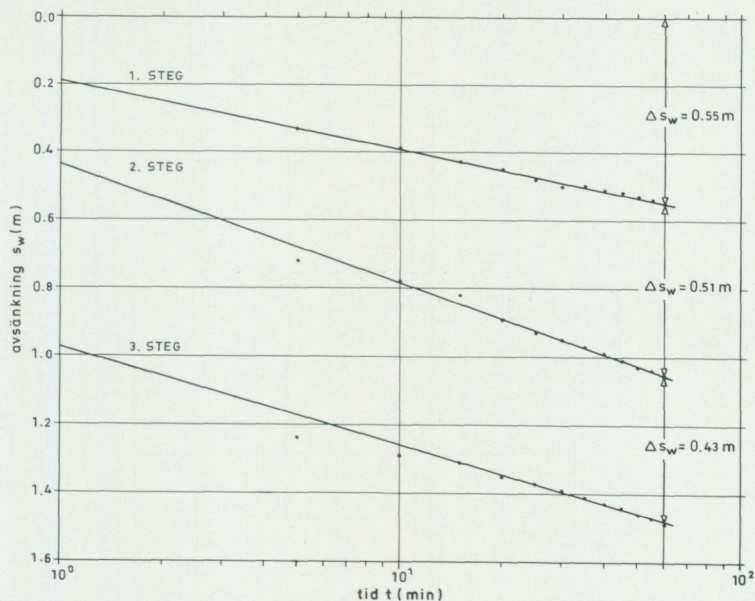


DIAGRAM 16. Stegprov-pumpning vid Myra. Bestämning av B och C.
Step drawdown test at Myra. Determination of B and C.

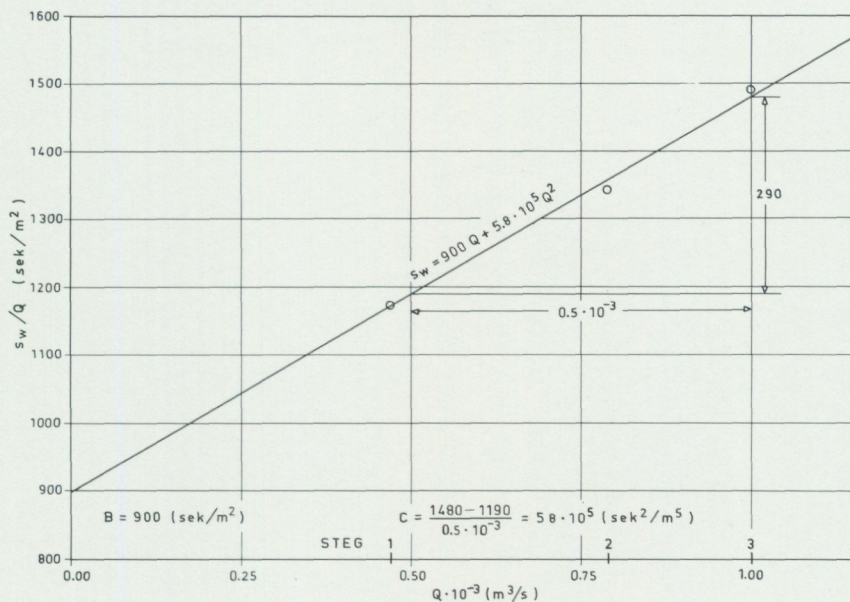


DIAGRAM 17. Stegprov pumpning vid Myra. Kapacitet — avsänkning. Pumpbrunnen.
 Step drawdown test at Myra. Capacity — drawdown. The pumping well.

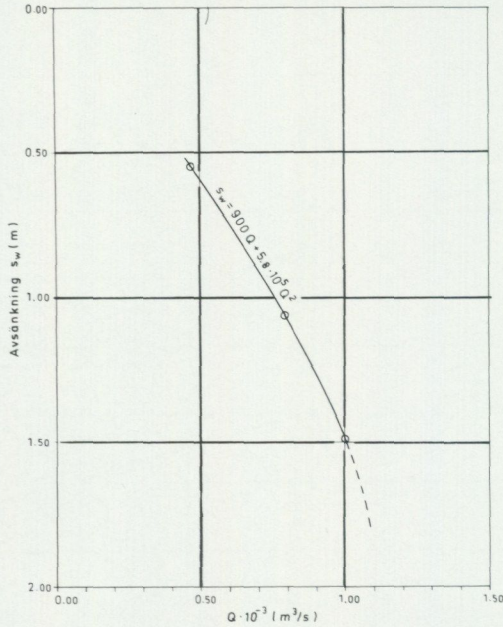


DIAGRAM 18. Stegprov pumpning vid Vreta. Tid — avsänkning. Pumpbrunnen.
 Step drawdown test at Vreta. Time — drawdown. The pumping well.

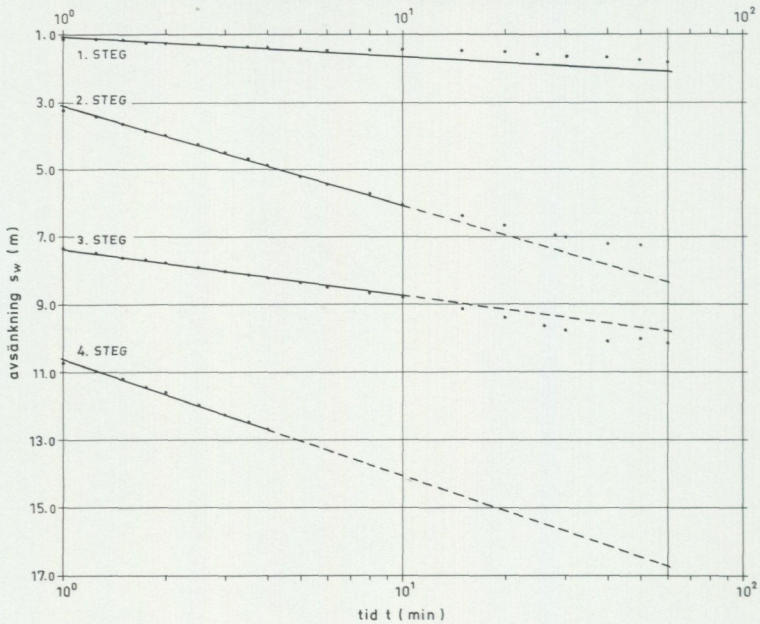


DIAGRAM 19. Stegprovspumpning vid Vreta. Bestämning av B och C.
 Step drawdown test at Vreta. Determination of B and C.

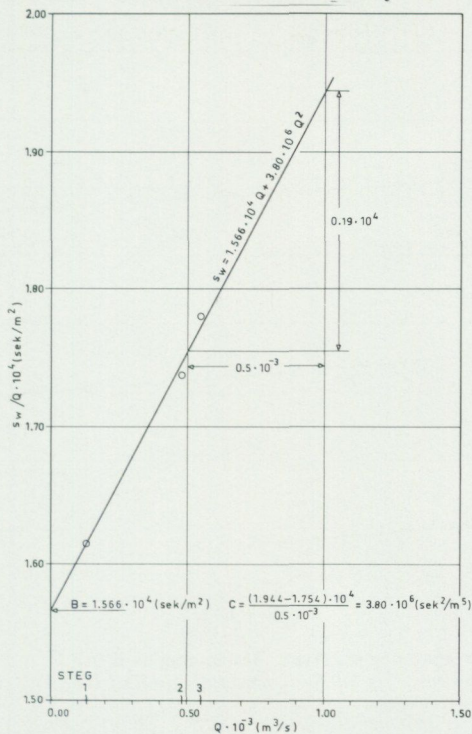


DIAGRAM 20. Stegprovspumpning vid Vreta. Residual avsänkning. Pumpbrunnen.
 Step drawdown test at Vreta. Residual drawdown. The pumping well.

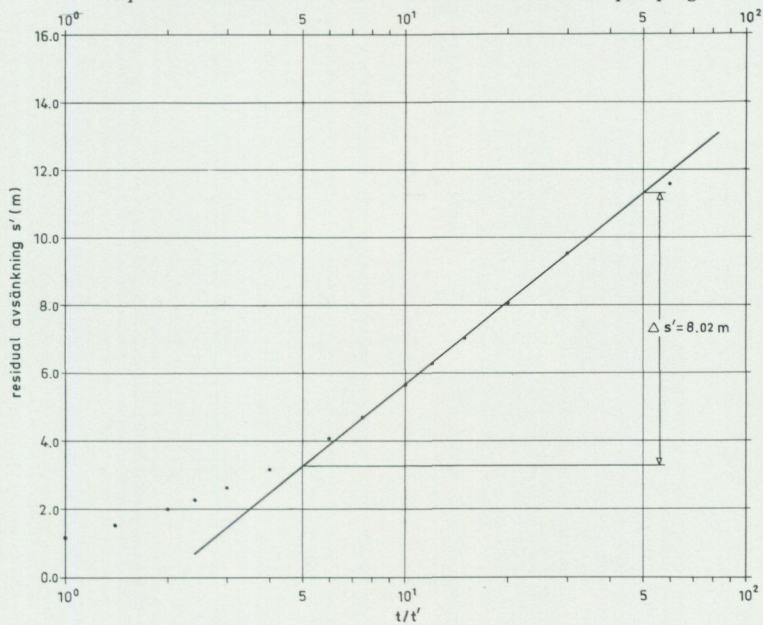


DIAGRAM 21. Stegprovspumpning vid Aska. Tid — avsänkning. Pumpbrunnen.
Step drawdown test at Aska. Time — drawdown. The pumping well.

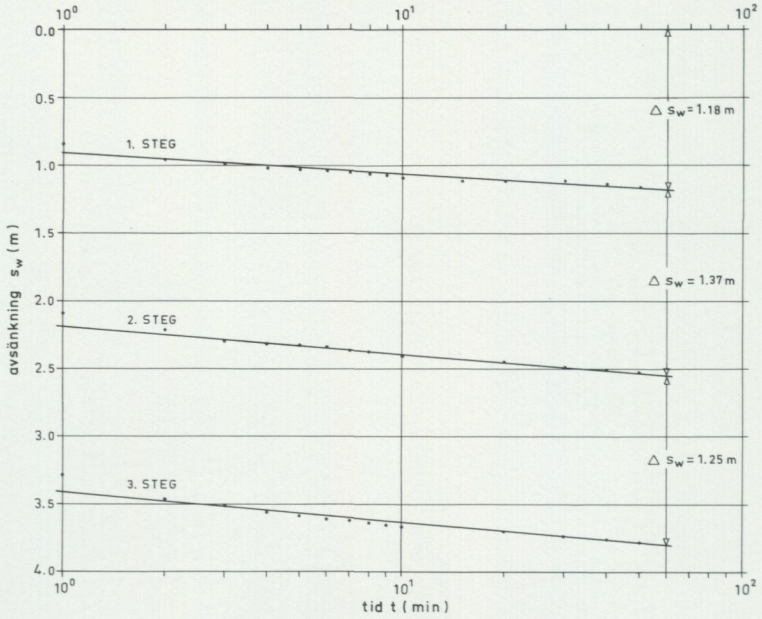


DIAGRAM 22. Stegprovspumpning vid Aska. Bestämning av B och C.
Step drawdown test at Aska. Determination of B and C.

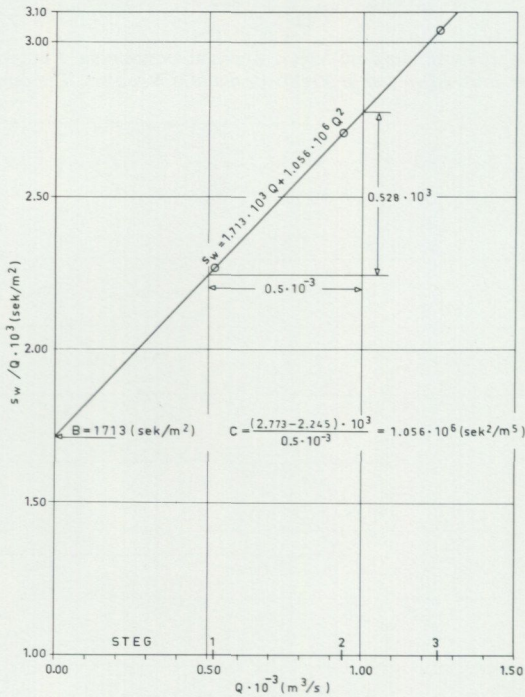
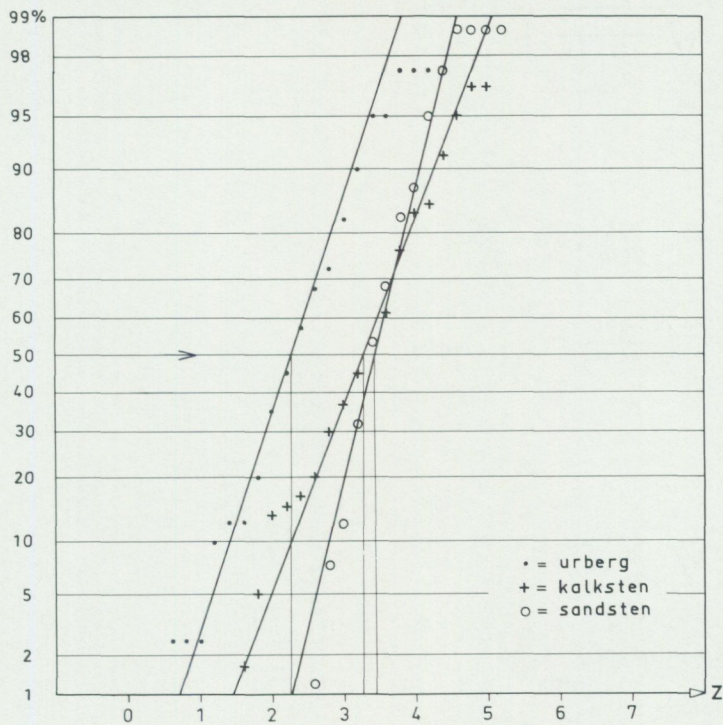


DIAGRAM 23. Östergötlands kambrosilurumråde. Fördelning av parametern Z.
 The Cambro-Silurian area of Östergötland. Distribution of the parameter Z.



FORMELBILAGA

$$s_w = \frac{Q}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{t}{TB \cdot SB}} + C \quad (1)$$

$$s = \frac{QE}{2TB} e^{-x/E} \quad (2)$$

$$x = 0 \Rightarrow s = \frac{QE}{2TB}; TB = \frac{QE}{2s} \quad (3)$$

$$\sqrt{K_r K_z \cdot r_f} = \frac{QSD}{4\pi Hs} \quad (4)$$

$$\frac{K_r}{S_s r_f^2} = \frac{t_D}{t} \quad (5)$$

$$H_D = \frac{H}{r_f} \sqrt{\frac{K_r}{K_z}} \quad (6)$$

$$Z = \log(10^6 \cdot q/M) \quad (7)$$

$$K = 10^{[Z - C + \log(\log R/r)]} \quad (8)$$

$$s_w = BQ + CQ^P \quad (9)$$

BETECKNINGAR

A	(m ²)	area <i>area</i>
B	(s/m ²)	formationsfaktor för laminära energiförluster <i>formation factor for laminar head losses</i>
B	(m)	kanalbredd <i>channel width</i>
C	(s ² /m ⁵)	brunnsfaktor för turbulenta energiförluster <i>well factor for turbulent head losses</i>
E	(m)	läckagefaktor för kanal <i>leakage factor for channel</i>

H	(m)	akviferens mäktighet <i>thickness of the aquifer</i>
K	(m/s)	permeabilitet <i>permeability</i>
K_0 (r/B)		Bessel-funktion av 2:a slaget och av noll:te ordningen <i>Bessel function of the second kind and of zero order</i>
m	(m)	akviferens mättade tjocklek <i>saturated thickness of the aquifer</i>
m'	(m)	tätande lagers mäktighet <i>thickness of confining bed</i>
P'	(m/s)	vertikal permeabilitet i tätande lager <i>vertical permeability of confining bed</i>
P'/m'	(s ⁻¹)	läckagekoefficient <i>leakage coefficient</i>
BP'/m'	(m/s)	läckagekoefficient för kanal <i>leakage coefficient for channel</i>
P		exponent för turbulent strömning <i>exponent of turbulent flow</i>
Q	(m ³ /s)	kapacitet <i>rate of discharge at pumping well</i>
q	(m ² /s)	specifik kapacitet <i>specific capacity</i>
R	(m)	influensradie <i>radius of area of influence</i>
r	(m)	radiellt avstånd från pumpbrunnen <i>radial distance from pumping well</i>
r/B		läckagefaktor <i>leakage factor</i>
r _e	(m)	influensradie <i>radius of area of influence</i>
r _f	(m)	horisontell sprickradie <i>horizontal fracture radius</i>
r _w	(m)	pumpbrunnens effektiva radie <i>effective radius of pumping well</i>
S		magasinkoefficient <i>storage coefficient</i>
S _s		specifik magasinkoefficient <i>specific storage coefficient</i>
SB	(m)	kanalmagasin <i>channel storage</i>
s	(m)	avsänkning <i>drawdown</i>

s_w	(m)	avsänkning i pumpbrunnen <i>drawdown in the pumping well</i>
Δs	(m)	avsänkning per logaritmisk dekad <i>drawdown per log cycle</i>
s'	(m)	residual avsänkning <i>residual drawdown</i>
s''	(m)	korrigerade återhämtningsdata <i>adjusted recovery data</i>
T	(m ² /s)	transmissivitet <i>transmissivity</i>
TB	(m ³ /s)	kanalkonduktivitet <i>channel conductivity</i>
t	(min, s)	tid sedan provpumpningen startade <i>time since pumping test started</i>
t'	(min, s)	tid sedan provpumpningen stoppade <i>time since pumping test stopped</i>
W (u,r/B)		brunnfunktion för läckande, slutet grundvattenmagasin <i>well function for leaky confined groundwater reservoir</i>
x	(m)	parallellt avstånd från pumpbrunnen <i>parallel distance from pumping well</i>
Y		parameter relaterad till transmissivitet <i>parameter related to transmissivity</i>
Z		parameter relaterad till permeabilitet <i>parameter related to permeability</i>

Index

Subscripts

D	dimensionslös <i>dimensionless</i>
m	match-punktskoordinat <i>coordinate of match-point</i>
x, y, z, r,	i förhållande till respektive riktning <i>relative to respective direction</i>

APPENDIX 2

AV

PER ENGQVIST

Grundvattnets kemi**Bedömningsgrunder för vattenanalyser**

I serien Meddelanden från Kungl. Medicinalstyrelsen nr 122 (1968) avseende Fysikalisk-kemiska vattenundersökningar finns anvisningar om hur vatten skall bedömas ur såväl teknisk som hygienisk synpunkt. Socialstyrelsens författningssamling, SOSFS (M) 1977:27, ersätter ovannämnda skrift vad beträffar fluorider. Olika bedömningsgrunder gäller för vatten underkastat kontroll enligt 32 och 33 §§ hälsovårdsstadgan och vatten för enskild förbrukning. Samma föreskrifter som angivits för vatten underkastade 32 och 33 §§ hälsovårdsstadgan tillämpas även för undersökning och bedömning av renvatten som avses i 3 och 14 §§ livsmedelsstadgan samt övrigt renvatten (dock ej renvatten för enskild förbrukning), t.ex. vatten avsett för sjukhus, ålderdomshem, skolor, barnhem och andra vårdanstalter samt för hotell och pensionat. Tabell 21 uppger några ämnen och egenskaper hos vattnet med anvisningar om rekommenderad maximal koncentration åtföljda av enkla kommentarer. De rekommenderade koncentrationerna överensstämmer i huvudsak med de gränsvärden som angetts som med tvekan tjänligt eller ur hygienisk synpunkt anmärkningsvärda i Kungl. medicinalstyrelsens meddelande nr 122 när det gäller bedömning av vatten underkastat kontroll enligt 32 och 33 §§ hälsovårdsstadgan. Vad beträffar bedömning av vatten för enskild förbrukning gäller att man i allmänhet kan tolerera något högre halter av vissa ämnen. För utförligare besked om hur vatten skall bedömas hänvisas till ovannämnda skrifter.

TABELL 21. Maximalt rekommenderade koncentrationer jämte karakteristik (renvatten).
Recommended maximal concentrations and characterization (purified waters).

Ämne eller egenskap	Rekommenderad maximal koncentration	Karakteristik
Färgstyrka	40 mg/l Pt	Hög färgstyrka ger vattnet ett otillfredsställande utseende och kan indikera förorening.
Permanganatförbrukning, KMnO_4	40 mg/l	Permanganatstyrkan är i regel ett mått på halten organiska ämnen i vattnet.
Specifik ledningsförmåga		Ett mått på vattnets halt av lösta mineralsalter.
pH		Ett för vattnet onormalt pH-värde kan tyda på främmande påverkan av vattentäkten. Vatten från nyanlagda brunnar kan ha höga pH-värden. I regel fordras ny kemisk och bakteriologisk undersökning i dessa fall. pH-värdet bör ligga mellan 7 och 9.5.

Totalhårdhet	100 mg/l Ca	Beror på höga halter kalcium och magnesium. Förorsakar ökad tvålförbrukning genom att kalktvål bildas. Vid uppvärmning av hårt vatten kan olägenheter uppstå genom avsättningar i vattenvärmare, pannor, disk- och tvättmaskiner o.dyl. Följande skala för vattnets hårdhet brukar användas 0 — 15 mg/l Ca mycket mjukt 15 — 35 mg/l Ca mjukt 35 — 70 mg/l Ca medelhårt 70 — 150 mg/l Ca hårt över 150 mg/l Ca mycket hårt Hårdheten kan även anges i s.k. tyska hårdhetsgrader °dH.
Järn, Fe	0.4 mg/l Fe	Anmärkningsvärt höga halter förorsakar bruna fläckar på kläder, porslin o.d. Stora skillnader kan förekomma mellan rapporterade och verkliga koncentrationer beroende på tillskott från rör och ledningar. Koncentrationerna påverkas även av mikroorganismer. Järnhalten kan i nyanlagda brunar vara hög.
Mangan, Mn	0.1 mg/l Mn	Samma olägenheter som vid järn.
Klorid, Cl	300 mg/l Cl	Stora mängder ger tillsammans med det natrium som finns i vattnet en salt smak.
Fluorid, F	1.5 mg/l F	Koncentrationer omkring 1 mg/l F ger skydd mot karies (tandröta). Koncentrationer över 1.5 mg/l F kan orsaka besvär såsom fläckar på tänderna. Vatten med fluoridhalten 6 mg/l F eller högre skall bedömas som otjänligt.
Sulfat, SO ₄	200 mg/l SO ₄	Höga halter i kombination med magnesium och natrium kan verka laxerande.
Ammonium, NH ₄	0.5 mg/l NH ₄	Ammonium kan indikera förorening från exempelvis avlopp, djurstallar eller konstgödsel. Kan även förekomma normalt i vattnet och saknar då betydelse ur hygienisk synpunkt.
Nitrat, NO ₃	30 mg/l NO ₃	Höga koncentrationer kan indikera föroreningar från exempelvis avlopp, djurstallar eller konstgödsel. Om nitrathalten i vattnet överstiger 50 mg/l NO ₃ bör detta ej givas till barn under 1 år.
Nitrit, NO ₂	0.02 mg/l NO ₂	Höga koncentrationer kan indikera föroreningar från avlopp, djurstallar eller konstgödsel.
Marmoraggressiv kolsyra, CO ₂		Ur halten marmoraggressiv kolsyra i förening med analysresultaten beträffande alkalitet, pH-värde och totalhårdhet kan man bedöma vattnets eventuella ledningsangripande egenskaper.

Olika faktorer som påverkar vattnets sammansättning

Nederbördens kemiska sammansättning

Praktiskt taget all nybildning av grundvatten sker genom tillförsel av nederbördsvatten. I regel är koncentrationerna av joner låga i nederbördsvattnet men dessa kan anrikas vid avdunstning. Sammanställningen i tabell 22 visar nederbördens sammansättning från en nederbördsstation vid Vreta Kloster. Mätningarna är gjorda under åren 1957 — 1962. Sistnämnda år upphörde de. För uppgifter efter denna tidpunkt har några resultat från en sta-

TABELL 22. Koncentrationen av några ämnen i nederbörden.
Concentration of some constituents in precipitation.

	År	Nederbörd mm	S mg/l	Cl mg/l	NO ₃ -N mg/l	NH ₄ -N mg/l	Na mg/l	K mg/l	Mg mg/l	Ca mg/l	pH
31. Vreta kloster	1957	747	1.10	0.49	0.17	0.25	0.30	0.16	0.09	0.88	5.7
	1958	453	0.97	0.75	0.25	0.29	0.43	0.26	0.14	1.36	5.4
	1959	390	1.18	0.66	0.29	0.39	0.51	0.30	0.18	1.17	5.7
	1960	552	1.03	0.46	0.25	0.32	0.35	0.25	0.12	0.88	5.2
	1961	422	1.44	0.68	0.27	0.28	0.51	0.28	0.15	1.17	5.2
	1962	478	1.57	0.75	0.23	0.20	0.42	0.17	0.08	0.67	4.6
	80. Töreboda	1973	504	1.25	0.64	0.44	0.51	0.34	0.18	0.10	0.29
1974		639	0.92	0.58	0.38	0.36	0.33	0.11	0.07	0.39	4.5

Uppgifterna härrör från Internationella meteorologiska institutet, IMI.

tion belägen i Töreboda nordväst om Vättern medtagits. Dessa uppgifter är från åren 1973 och 1974 och återfinns även de i tabell 22. Som framgår av tabellen har pH-värdet sjunkit något med tiden. Några andra förändringar är svåra att utläsa. När nederbördsvattnet kommer i kontakt med jord och berg får vattnet tillskott av en mängd olika ämnen vilket resulterar i att vattnet får en delvis annan karaktär.

Biologisk aktivitet

Den biologiska aktiviteten i de övre markskikten har avgörande betydelse för grundvattnets sammansättning och egenskaper. I dessa skikt tas tidvis somliga ämnen, t.ex. kväve upp av växter och djur, medan andra, t.ex. klorid passerar genom marken utan att nämnvärt påverkas. En viktig process i marken är organismernas förbrukning av syre och produktion av koldioxid. Koldioxiden, som tillförs grundvattnet, är den viktigaste komponenten vid kemisk vittring. Kommer koldioxidrikt vatten i kontakt med lättvittrad kalksten blir vattnet hårt.

Järn och manganhalterna i grundvattnet påverkas i viss utsträckning av förekomsten av speciella bakterier. Dessa är redox- och pH-beroende och medverkar vid oxidationsprocesserna.

Jord- och bergarternas betydelse för grundvattnets sammansättning

När vattnet strömmar genom jordlager och berggrund sker ständigt mer eller mindre omfattande förändringar av dess sammansättning. De största förändringarna sker i den omättade zonen, där den biologiska aktiviteten är störst. Gaser, främst syre och koldioxid, står där i kontakt med vatten och mineral. Vittringen är därför mer omfattande där än under grundvattenytan där uppträdandet av aktiva gaser minskar. Utlösningen av mineral blir därigenom mindre omfattande under grundvattenytan. Avgörande betydelse för vattnets slutgiltiga karaktär är även det genomströmmande vattnets sammansättning och strömhastighet. Strömhastigheten påverkar kontakttidens längd mellan mineral och vat-

ten. Av stor vikt är även kontaktytans storlek. Till exempel har finkorniga material såsom leror stora kontaktytor och långsam genomströmning, det vill säga även lång uppehållstid för vattnet. Jämvikt mellan mineral och vatten kan då hinna inställa sig. I kalkberggrund där vattnet tvingas strömma fram med relativt hög hastighet i sprickor är förutsättningarna för kemisk jämvikt inte fullt så goda.

Inom olika bergarter kan svavelkis (pyrit), FeS_2 , uppträda mer eller mindre frekvent. Främst förekommer svavelkisen i alunskiffern men även i övriga skifferar. Pyriten i lager, som genom grundvattenavsänkning hamnar ovan grundvattenytan oxideras av luftens syre. Därvid kan svavelsyra bildas, som kan verka kraftigt utlösande på olika mineral. Om de genomluftade lagren åter genomströmmas av vatten, ökar järn, och sulfathalterna i grundvattnet. Kalken i berggrunden kan efterhand neutralisera vattnet, men olägenheterna med höga halter av järn och sulfat kvarstår. Även andra ämnen kan i detta sammanhang tillföras vattnet exempelvis mangan. Graden av pyritoxidation är störst när pyriten finns i närheten av grundvattenytan. Kraftig pumpning eller naturlig avsänkning av grundvattenytan kan lätt medföra att ovannämnda olägenheter uppstår. Förutsättningen för pyritoxidation är mindre i djupt belägna akviferer.

Vattnets halt av lösta ämnen ökar i regel, dock inte alltid, när vattnet strömmar fram genom en avlagring. Samtidigt kan en viss omfördelning ske av de ingående enskilda komponenterna i vattnet på så sätt att de mest svårslösliga salterna faller ut före de lättlösliga. Detta medför att lättlösliga ämnen kommer att uppträda i allt högre koncentrationer ju längre tid vattnet uppehåller sig i akviferen. Exempel på ett lättlösligt ämne är vanligt koksalt, NaCl . Dess halt brukar i allmänhet öka i de djupare akvifererna.

Kemiska processer av betydelse för grundvattnets sammansättning

Grundvattnets huvudbeståndsdelar är kalcium, magnesium, natrium, klorid, sulfat och bikarbonat. Genom utlösning av mineral tillförs dessa grundvattnet. Kalcium, magnesium, natrium och kalium tillförs även grundvattnet när silikatmineralen i marken omvandlas till nya mineral i närvaro av vatten. Ämnen som gått i lösning kan ibland åter fällas ut. Detta gäller svårösta ämnen, t.ex. kalciumkarbonat, kalciumfluorid eller kalciumsulfat. Andra för grundvattnets sammansättning viktiga processer är adsorption och jonbyte. När mineralpartiklarna blir mycket små kommer gränzytan mellan fast fas och flytande fas att bli betydlig. Om man antar att en viss mängd av ett ämne kan adsorberas per ytenhet av den fasta fasen så kan den totala adsorberande mängden bli mycket stor när det gäller mycket finkorniga jordarter såsom leror. Glaukonit och lermineral förekommer ofta i Östergötlands skifferar. Dessa kan under särskilda betingelser tjänstgöra som jonbytare, vilket innebär att en adsorberad jon kan ersättas av en annan jon. Natrium kan t.ex. ersättas av kalcium om natrium finns i överskott och tvärtom. Om själva jonbytaren genomgår förändringar i samband med jonbytet skall processen egentligen inte kallas jonbyte, men i det följande har inte någon strikt gränsdragning gjorts mellan verkligt jonbyte och snarlika processer. Det salta vatten som en gång täckt Östergötlands sedimentära berggrund kan ha "regenererat" förekomsten av t.ex. glaukonit och lermineral på samma sätt som man regenererar avhärdningsfilter med koksalt. När de ur kalkstenen utlösta kalciumjonerna i det genomströmmande grundvattnet när denna typ av bergarter byts kalciumjonerna ut mot de natriumjoner som sitter på mineralpartiklarnas ytor. Det hårda kalciumrika vattnet kommer därigenom att bli mjukt. Högt pH-värde anses underlätta jonbytesprocesser.

Jonfiltrering är en annan inte fullt så känd process som kan förändra vattnets sammansättning. Denna process, som bl.a. beskrivits av Wood (1976), går i all korthet ut på att le-

ror kan få membranegenskaper. Om vattnet i marken av gravitationen tvingas att strömma genom "membranet" eller "filtret" kommer endast de neutrala vattenmolekylerna att kunna passera, medan laddade joner på grund av den s.k. filtereffekten blir kvar ovanför "filtret". Dessa laddade joner kommer då att koncentreras ovan "filtret" och vid övermättnad kommer dessa att falla ut. Back & Hanshaw (1965) har med laboratorieförsök visat att konsoliderade leror kan få sådana egenskaper att de kan uppträda som ett semipermeabelt membran.

Andra viktiga processer i grundvattnet är oxidation och reduktion med eller utan hjälp av mikroorganismer. Det är framför allt tillgången på syre som avgör om det blir oxidation eller reduktion. Dessa processer är även pH-beroende. Förekomsten av järn och mangan i grundvattnet regleras av pH-värdet och redoxpotentialen.

Många kemiska och fysikaliska processer i grundvattnet är temperaturberoende. När det gäller grundvattnets temperatur brukar man räkna med att de dagliga temperaturförändringarna i luften kan registreras inom de två översta metrarna i marken. Mellan två och fem meter kan månatliga variationer förekomma. Under fem-metersnivån kan endast årliga förändringar observeras, vanligen tidsförskjutna och försvagade. Under trettio meters djup är grundvattentemperaturen i normala fall helt oberoende av lufttemperaturen. Normalt brukar temperaturen stiga med en till två grader för var femtionde meter. För det djupa grundvattnet kan man således räkna med att temperaturen är tämligen konstant.

Som tidigare nämnts betyder sannolikt vattnets uppehållstid en hel del för att olika kemiska jämvikter skall kunna uppnås. Ett mått på vattnets ålder ger vattnets halt av tritium. Tritium är en väteisotop med två neutroner som bildas naturligt i låga koncentrationer genom kosmisk strålning. Kärnladdningssprängningar har givit starkt förhöjda halter tritium till atmosfären. Tritium sönderfaller med en halveringstid på 12.26 år. Tritiumhalten i vattnet blir därigenom ett mått på den tid som förflutit sedan infiltrationen ägt rum under förutsättning att inget vattentillskott av annan ålder förekommit. Resultat från ett 50-tal tritiumanalyser finns redovisade i fig. 3 och i viss utsträckning i tabell 24. Av figuren framgår att vattnet i den kambriska sandstenen vanligen är minst 30 år gammalt.

Avsikten med denna schematiska genomgång av olika processer som påverkar grundvattnets sammansättning har gjorts för att visa mängden av faktorer som är av betydelse i detta sammanhang. För mera ingående studier hänvisas till facklitteraturen. Bland de utländska handböckerna kan nämnas Hem 1970, Matthes 1973, Stumm & Morgan 1970 och Back & Hanshaw 1965. Mera direkt anpassade för nordiska förhållanden är Eriksson & Holtan 1974 och Jacks 1973.

TABELL 23. Sammanställning av vattenanalyser från brunnar i olika bergarter.
Water analyses from different aquifers.

	Brunns- djup m	pH	Spec. lednings- förmåga $\mu\text{S}/\text{cm}$	KMnO ₄ - förbr. mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	Na mg/l	K mg/l	Cl mg/l	SO ₄ mg/l	HCO ₃ mg/l	Fe mg/l	Mn mg/l	F mg/l
KALKSTEN, 31 st														
Medelvärde	41		485	5	77	10	19	6.4	23	28	266	0.75	0.04	0.4
Standardavvikelse	26.2		148.8	2.6	28.3	5.2	10.2	11.5	18.2	15.3	67.3	0.75	0.04	0.2
Medianvärde	34	7.5	453	5	83	10	16	2.6	16	28	267	0.58	0.02	0.3
Högsta värde	132	7.95	980	12	154	22	48	55	95	64	395	2.5	0.17	0.7
Lägst värde	9	7.15	122	3	16	2	5	1.4	8	2	39	0.08	0.02	0.1
KALKSTEN-SKIFFER, 12 st														
Medelvärde	71		503	5	53	7	56	2.4	36	27	252	0.51	0.03	1.3
Standardavvikelse	33.2		224.3	2.1	49.8	6.4	35.3	1.5	32.1	26.3	74.4	0.44	0.02	0.7
Medianvärde	55	7.8	444	4	40	4	51	1.7	18	23	230	0.28	0.02	1.2
Högsta värde	135	8.5	1200	9	186	22	120	5.7	120	79	455	1.44	0.08	2.3
Lägst värde	28	7.1	277	3	6	1	10	0.6	12	2	145	0.10	0.02	0.32
KALKSTEN-SAND- STEN, 56 st														
Medelvärde	87		484	5	51	6	55.6	4.6	46	20	230	0.61	0.04	1.3
Standardavvikelse	21.7		167.9	2.4	37.2	6.0	33.0	9.0	52.8	23.2	68.1	0.97	0.03	1.3
Medianvärde	85	7.8	447	5	44	3	51	2.6	23	7	216	0.26	0.02	0.9
Högsta värde	144	8.8	1000	17	167	31	130	64	272	100	405	5.70	0.15	7.6
Lägst värde	35	7.1	229	3	5	1	10	0.6	7	2	95	0.08	0.02	0.1

TABELL 23, forts.

	Brunns- djup m	pH	Spec. lednings- förmåga $\mu\text{S}/\text{cm}$	KMnO_4 - förbr. mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	Na mg/l	K mg/l	Cl mg/l	SO_4 mg/l	HCO_3 mg/l	Fe mg/l	Mn mg/l	F mg/l
SKIFFER-URBERG,														
10 st														
Medelvärde	63		547	5	61	6	58	3.4	41	45	251	1.56	0.09	0.98
Standardavvikelse	12.5		151.6	1.8	31.7	5.1	30.2	1.5	39.6	44.4	74.5	2.89	0.10	0.7
Medianvärde	57	7.6	549	5	49	3	48	2.9	20	13	218	0.31	0.02	0.7
Högsta värde	90	8.5	1500	19	218	25	88	90	165	255	388	9.90	0.28	2.7
Lägsta värde	50	7.1	116	3	14	3	5	1.3	9	2	163	0.22	0.02	0.32
SANDSTEN, 21 st														
Medelvärde	29		531	5	74	8	35	7.0	27	47	257	0.55	0.04	0.7
Standardavvikelse	11.4		193.4	1.8	44.3	4.5	18.6	12.6	19.2	36.9	76.2	0.65	0.05	0.5
Medianvärde	27	7.6	476	4	65	7	26	2.9	16	41	251	0.40	0.02	0.7
Högsta värde	52	8.1	952	9	153	19	70	58	63	114	409	3.3	0.25	1.5
Lägsta värde	13	7.2	289	3	20	1	14	1.4	7	3	128	0.10	0.02	0.1
SANDSTEN-URBERG,														
21 st														
Medelvärde	61		622	7	82	9	50	8.6	49	63	270	1.50	0.07	1.0
Standardavvikelse	31.8		251.3	3.7	44.6	5.7	29.3	19.0	38.0	57.4	96.0	2.14	0.07	0.7
Medianvärde	45	7.5	549	6	78	7	39	2.9	34	36	266	0.47	0.04	0.8
Högsta värde	135	8.5	1500	19	218	25	88	90	165	255	560	7.50	0.30	2.9
Lägsta värde	23	7.1	116	3	14	3	5	1.3	9	2	39	0.11	0.02	0.1

TABELL 23, forts.

	Brunns- djup m	pH	Spec. lednings- förmåga μS/cm	KMnO ₄ - förbr. mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	Na mg/l	K mg/l	Cl mg/l	SO ₄ mg/l	HCO ₃ mg/l	Fe mg/l	Mn mg/l	F mg/l
KALKSTEN-URBERG,														
15 st														
Medelvärde	100		502	5	60	7	49	6.3	40	33	239	0.34	0.41	1.2
Standardavvikelse	25.8		192.9	1.8	43.3	6.3	33.1	12.6	56.0	29.2	68.4	0.29	0.04	0.7
Medianvärde	97	7.7	460	4	75	5	34	2.7	21	22	236	0.23	0.02	1.0
Högsta värde	152	8.7	900	9	133	22	125	52	240	76	416	1.07	0.15	2.9
Lägsta värde	59	7.0	262	3	8	1	8	0.6	6	2	131	0.08	0.02	0.4
SKIFFER, 3 st														
Medelvärde	34		840	7	129	11	49	8.6	88	65	348	1.09	0.05	0.4
Standardavvikelse	13.5		261.2	3.1	8.8	6.7	46.7	7.4	93.2	37.7	24.1	0.77	0.03	0.2
Medianvärde	35	7.4	660	5	134	7	16	4.2	28	70	350	1.00	0.04	0.3
Högsta värde	50	7.6	1210	11	137	20	115	19.0	220	109	377	2.08	0.08	0.6
Lägsta värde	17	7.1	652	4	117	5	16	2.6	17	17	318	0.19	0.02	0.24
SKIFFER-SANDSTEN,														
30 st														
Medelvärde	50		486	7	70	8	35	4.7	22	43	262	1.04	0.06	0.8
Standardavvikelse	15.7		136.8	2.4	36.6	4.9	19.3	6.0	14.7	33.4	65.8	1.05	0.08	0.8
Medianvärde	46	7.6	466	5	66	7	27	3.2	16	39	256	0.80	0.04	0.5
Högsta värde	87	8.4	794	14	150	19	96	36	57	125	462	4.40	0.44	4.0
Lägsta värde	31	7.1	249	3	10	1	12	1.2	6	7	129	0.12	0.02	0.16

TABELL 23, forts.

	Brunns- djup m	pH	Spec. lednings- förmåga $\mu\text{S}/\text{cm}$	KMnO ₄ - förbr. mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	Na mg/l	K mg/l	Cl mg/l	SO ₄ mg/l	HCO ₃ mg/l	Fe mg/l	Mn mg/l	F mg/l
URBERG, 27 st														
Medelvärde	57		786	8	107	14	55	7.5	66	106	299	0.97	0.09	1.0
Standardavvikelse	32.5		320.0	4.9	55.1	9.3	50.9	8.9	46.9	130.3	126.7	1.11	0.13	1.0
Medianvärde	56	7.4	722	7	102	11	36	3.6	49	63	324	0.47	0.06	0.6
Högsta värde	127	9.0	1680	24	255	34	250	41.0	168	700	540	5.00	0.63	4.2
Lägsta värde	10	6.1	311	3	24	2	9	1.0	11	19	16	0.08	0.02	0.1
SALTA BRUNNAR, 6 st														
Medelvärde	122		3040	16	281	13	375	22.7	1039	21	133	0.88	0.07	1.2
Standardavvikelse	48.3		994.7	4.4	143.6	12.3	97.7	41.7	419.2	30.8	111.8	0.59	0.09	0.7
Medianvärde	75	7.4	2740	12	224	7	300	4.0	765	5	90	0.63	0.02	1.2
Högsta värde	183	7.8	4800	22	550	38	500	116.0	1750	89	360	2.1	0.28	2.2
Lägsta värde	73	7.1	1830	11	113	2	300	2.5	610	2	60	0.36	0.02	0.2

TABELL 24. Urval av fysikalisk-kemiska analyser av grundvatten.
Physical-chemical analyses of groundwater.

Analys		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Brunnsnummer		8FNO:51	8FNV:169	8ENO:81	8FNV:92	8ENO:42	8FNO:112	8FNV:32	8ENO:78	8FNV:280
Lagerföljd		KS	KS	KS-SK	KS-SK	KS-SS	KS-SS	KS-SS	KS-UB	KS-UB
Brunnens djup	m	34	49	55	50	114	76	88	91	59
pH		7.40	7.15	7.80	7.60	8.15	8.00	8.15	7.50	8.20
Spec. ledningsförmåga	µS/cm	446	454	406	469	370	295	352	460	384
Permanganatförbrukning, KMnO ₄	mg/l	12	5	5	3	6	4	5	4	3
Kalcium, Ca	mg/l	68	75	40	89	16	39	15	78	11
Magnesium, Mg	mg/l	10	14	4	9	2	5	2	7	1
Natrium, Na	mg/l	23	14	60	11	77	25	75	25	84
Kalium, K	mg/l	4.0	2.6	2.6	2.6	3.0	2.9	1.8	3.6	1.0
Klorid, Cl	mg/l	16	13	12	16	23	12	27	12	36
Sulfat, SO ₄	mg/l	28	33	6	55	2	4	6	22	14
Alkalitet, HCO ₃	mg/l	253	275	278	251	227	187	205	286	181
Järn, Fe	mg/l	0.16	2.10	0.28	0.52	0.36	0.39	0.24	0.41	0.12
Mangan, Mn	mg/l	<0.02	0.06	0.04	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02
Fluorid, F	mg/l	0.58	0.46	1.15	0.36	2.20	0.80	2.25	0.60	1.89
Aggressiv kolsyra, CO ₂	mg/l	4	13	0	0	0	0	0	0	0
Ammonium, NH ₄	mg/l	0.10	0.13	0.37	0.20	0.15	0.53	0.23	0.01	0.12
Nitrit, NO ₂	mg/l	0.04	0.02	<0.01	<0.01	0.02	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Nitrat, NO ₃	mg/l	4.3	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	1.3	<0.1
Tritium	TU	-	87±3	-	-	3	3	112±3	3	3

TABELL 24, forts.

Analys		10	11	12	13	14	15	16	17
Brunnsnummer		8ESO:41	8FNV:222	8FNV:249	8ENO:57	8FNO:331	8FNV:81	8FNV:189	8FNV:144
Lagerföljd		SK	SK-SS	SK-SS	SK-UB	SK-UB	SS	SS	SS-UB
Brunnens djup	m	17	49	59	82	64	29	23	40
pH		7.4	8.05	7.50	7.60	7.60	7.70	7.30	7.25
Spec. ledningsförmåga	µS/cm	660	375	404	549	447	348	530	663
Permanganatförbrukning, KMnO ₄	mg/l	11	3	6	5	5	4	9	7
Kalcium, Ca	mg/l	134	13	69	72	34	40	96	117
Magnesium, Mg	mg/l	5	3	6	7	1	5	7	6
Natrium, Na	mg/l	16	82	17	39	85	40	14	24
Kalium, K	mg/l	19.0	1.3	3.4	3.5	3.6	2.9	4.2	8.9
Klorid, Cl	mg/l	17	9	14	14	11	7	10	45
Sulfat, SO ₄	mg/l	109	4	11	73	6	17	4	69
Alkalitet, HCO ₃	mg/l	318	254	251	247	310	226	328	310
Järn, Fe	mg/l	2.08	0.25	0.83	0.48	0.31	0.40	0.42	4.50
Mangan, Mn	mg/l	0.04	<0.02	0.44	0.04	0.02	0.04	<0.02	0.10
Fluorid, F	mg/l	0.24	2.10	0.16	0.59	1.2	0.37	0.70	0.50
Aggressiv kolsyra, CO ₂	mg/l	0	0	0	0	0	0	0	3
Ammonium, NH ₄	mg/l	0.05	0.16	0.15	0.32	0.30	0.45	<0.01	0.64
Nitrit, NO ₂	mg/l	0.08	<0.01	0.03	0.84	0.01	<0.01	0.10	0.04
Nitrat, NO ₃	mg/l	16.8	<0.1	0.6	0.3	0.09	<0.1	0.4	0.2
Tritium	TU	-	-	3	-	3	3	5±3	-

TABELL 24, forts.

Analys		18	19	20	21	22	23	24	25
Brunnsnummer		8FNO:24	8FSV:58	8FSV:38	8FNV:129	8ENO:86	8FNO:160	8FNV:124	8FNO:70
Lagerföljd		SS-UB	UB	UB	Sil SK	Visingsö	UB	KS-SS	UB
Brunnens djup	m	77	28	51	54	76	73	166	43
pH		7.70	7.50	7.30	7.60	7.60	7.30	7.35	7.50
Spec. ledningsförmåga	µS/cm	526	486	746	490	139	4800	3760	805
Permanganatförbrukning, KMnO ₄	mg/l	9	4	10	12	3	22	20	11
Kalcium, Ca	mg/l	50	98	110	71	16	550	370	6
Magnesium, Mg	mg/l	4	10	11	19	3	13	7	2
Natrium, Na	mg/l	70	9	47	18	8	500	500	200
Kalium, K	mg/l	1.7	2.7	16.0	2.9	1.0	4.0	4.8	1.3
Klorid, Cl	mg/l	34	14	71	14	10	1750	1430	33
Sulfat, SO ₄	mg/l	26	62	57	15	21	13	5	62
Alkalitet, HCO ₃	mg/l	220	283	340	317	37	63	60	444
Järn, Fe	mg/l	0.19	5.00	1.80	1.86	0.06	2.50	0.80	0.16
Mangan, Mn	mg/l	<0.02	0.04	<0.02	0.04	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02
Fluorid, F	mg/l	1.70	0.50	1.50	0.84	0.17	1.15	2.20	0.48
Aggressiv kolsyra, CO ₂	mg/l	0	0	0	0	26	7	6	0
Ammonium, NH ₄	mg/l	<0.01	0.05	0.26	0.26	<0.01	0.10	0.66	0.02
Nitrit, NO ₂	mg/l	0.44	<0.01	0.02	0.47	<0.01	<0.01	0.01	0.01
Nitrat, NO ₃	mg/l	<0.1	<0.1	1.5	2.3	2.8	<0.1	0.2	0.2
Tritium	TU	3	-	-	-	-	-	3	-

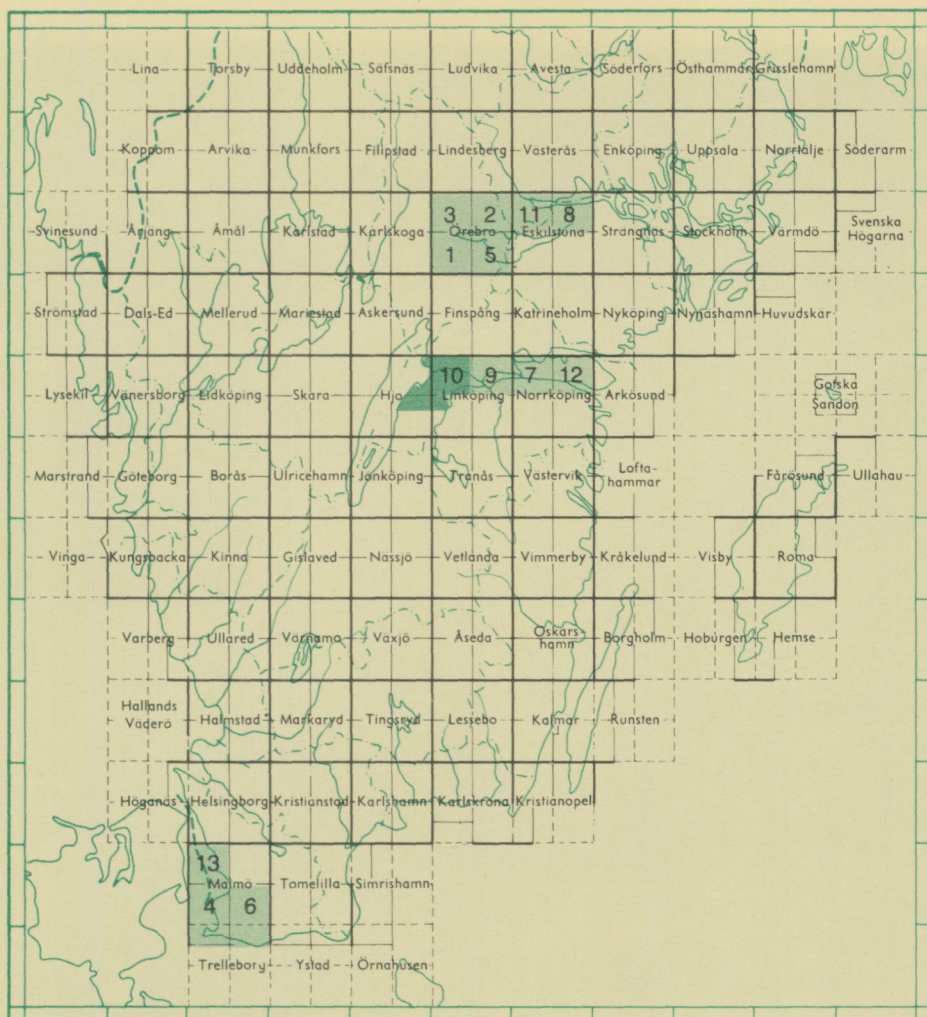
LITTERATUR

CTH = Chalmers Tekniska Högskola
 SGU = Sveriges geologiska undersökning
 UNGI = Uppsala Naturgeografiska Institution

- ANDERSEN, L. J., & HAMAN, Z., 1970: Nye metoder for prøvepumpning af borer og grundvandsreservoarer. — Dan. Geol. Unders. III nr 38.
- ANDERSSON, J. E., 1976: Olika metoder att analysera provpumpningsdata från Östergötlands kambrosilurområde. — UNGI Rapport 43.
- BACK, W., & HANSHAW, B., 1965: Chemical geohydrology. I *Advances in Hydrosience*. Vol. 2, s. 49—109.
- ENGVIST, P., 1969: Mineral and thermal waters of Sweden. — XXIII International Geological Congress. Vol. 18, s. 127—131.
- 1979: Grundvattnets kemiska sammansättning i Östergötlands sedimentära berggrund. — Vannet i Norden nr 1. Även i SGU Rapporter och meddelanden nr 14.
- ERIKSSON, E., & HOLTAN, H., 1974: Hydrokemi. Kemiska processer i vattnets kretslopp. — Nordic IHD Report No. 7.
- FROMM, E., 1976: Beskrivning till jordartskartan Linköping NO. — SGU Ae 19.
- GORBATSCHEV, R., FROMM, E., KJELLSTRÖM, G., 1976: Beskrivning till berggrundskartan Linköping NO. — SGU Af 107.
- GRINGARTEN, A. C., & WITHERSPOON, P. A., 1972: A method of analyzing pump test data from fractured aquifers. — Proc. Symp. on Percolation through fissured rock, ISRM, IAEG, Stuttgart.
- GUSTAFSON, G., 1978: Studies of the hydrogeology of subaqueous eskers. — CTH Publ. A 26, Avhandling.
- HAMAN, Z., & AMBO, K., 1973: Grafisk metode til bestemmelse af et grundvandsreservoirs transmissivitet på basis av den specifikke kapacitet. — Vandteknik, årgång 41, nr 6.
- HARRILL, J. R., 1970: Determining transmissivity from waterlevel recovery of a step-drawdown test. — U. S. Geol. Surv. Prof Paper 700-C.
- HEM, J., 1970: Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water. — U. S. Geol. Surv. Water-Supply Paper 1473. Second edition.
- JACKS, G., 1973: Chemistry of some ground waters in igneous rocks. — Nordic Hydrology, 4. s. 207—236.
- JETEL, J., 1967: A new comparative regional parameter of permeability for hydrogeologic maps. — Mem. Int. Assoc. Hydrogeol., 8 congr., Istanbul.
- JOHANSSON, H. G., 1975: Beskrivning till jordartskartan Hjo NO. — SGU Ae 22.
- 1976: Beskrivning till jordartskartan Linköping NV. — SGU Ae 24.
- KNUTSSON, G., & FAGERLIND, T., 1977: Grundvattentillgångar i Sverige. — SGU Rapporter och meddelanden nr 9.
- KUNGL. MEDICINALSTYRELSEN, 1968: Fysikalisk-kemiska vattenundersökningar. — Meddelanden från Kungl. Medicinalstyrelsen Nr 122. AB Nordiska Bokhandeln.
- LABADIE, J. W., & HELWEG, O. J., 1975: Step-drawdown test analysis by computer. — Ground Water. Vol. 13 nr 5.
- LOHMAN, S. W. m. fl., 1972: Definitions of selected groundwater terms-revisions and conceptual refinements. — U. S. Geol. Surv. Water-Supply Paper 1988, Washington.
- MATTHESS, G., 1973: Lehrbuch der Hydrogeologie. Band 2. Die Beschaffenheit des Grundwassers. — Gebrüder Borntraeger. Berlin.
- MELKERUD, P. A., 1977: Samband mellan morän och berggrund. En travers över Östergötlands kambrosilurområde. — Kvartärgeologiska institutionen, Stockholms universitet.
- MÜLLERN, C.-F., 1974: Artesiskt grundvatten och naturgas i Kvarntorp, Närke. — SGU C 707.
- NEUMAN, S. P., & WITHERSPOON, P. A., 1972: Field determination of the hydraulic properties of leaky multiple aquifer systems. — Water Resour. Res. Vol. 8 nr 5.
- SOCIALSTYRELSEN, 1977: Socialstyrelsens kungörelse om användning av fluorider i kariesprofylaktiskt syfte. — SOSFS (M) 1977:26.
- SOCIALSTYRELSEN, 1977: Socialstyrelsens kungörelse med bedömningsgrunder för konsumtionsvatten med avseende på fluoridhalten. — SOSFS (M) 1977:27.
- STUMM, W., & MORGAN, J. J., 1970: Aquatic Chemistry. An introduction emphasizing chemical equilibria in natural waters. — John Wiley & Sons, New York.
- THORSLUND, P., 1950/51: Grundvattnet på Östgötaslätten. — Grundförbättring Nr 3, Årg. 4.

- WALTON, W. C., 1970: Groundwater resource evaluation. — McGraw-Hill Book Company.
- WESTERGÅRD, A. H., 1940: Nya djupborrningar genom äldsta ordovicium och kambrium i Östergötland och Närke. — SGU C 437.
- 1944: Borrningar genom alunskifferlagret på Öland och i Östergötland 1943. — SGU C 463.
- WOOD, W. W., 1976: A hypothesis of ion filtration in a potable-water aquifer system. — Ground Water. Vol. 14, s. 223—244.

Utgivna kartblad i serie Ag



PRISKLASS B
 Distribution
 LiberKartor
 162 89 STOCKHOLM

ISBN 91-7158-237-1
 ISSN 0346-7333