

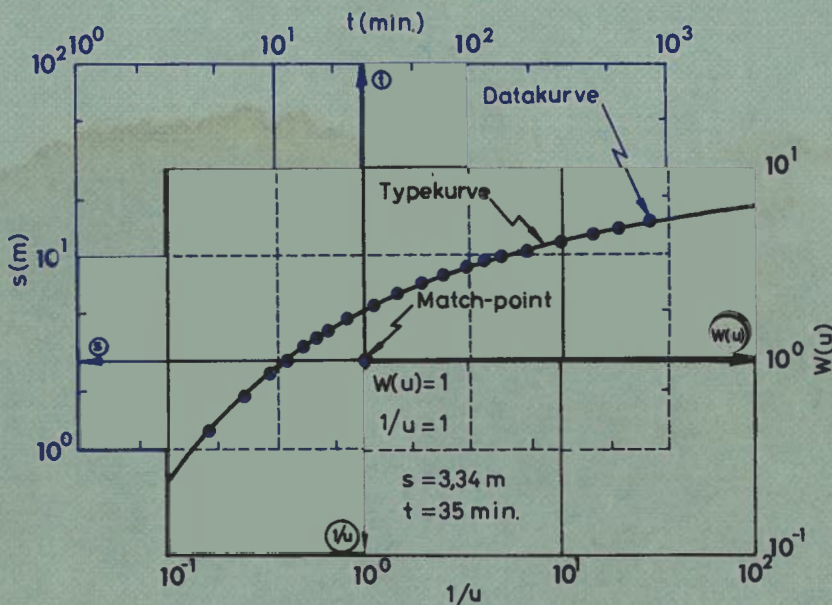
Nye metoder for prøvepumpning af boringer og grundvandsreservoirer

AF

Lars Jørgen Andersen og Zvonimir Haman

ENGLISH ABSTRACT

New methods for testing water wells and aquifers



DANMARKS GEOLOGISKE UNDERSØGELSE

III. RÆKKE. NR. 38

Geological Survey of Denmark, III. Series. No. 38

Nye metoder for prøvepumpning
af
boringer og grundvandsreservoirer

Af

Lars Jørgen Andersen og Zvonimir Haman

English abstract

New methods for testing water wells and aquifers

I kommission hos

C. A. REITZELS FORLAG

KØBENHAVN 1970

ISBN 87 421 06117

INDHOLD – CONTENTS

Forord.....	5
Abstract.....	7
Symbolforklaring – Symbols and units.....	9
Indledning.....	12
Teoretisk del.....	14
Historisk udvikling.....	14
Nogle hydrogeologiske begreber.....	16
Undersøgelse af en kildeplads.....	21
Nyt indvindingsområde.....	21
Eksisterende indvindingsområde.....	22
Målinger før start af prøvepumpning.....	22
Prøvepumpningsprocedure.....	24
Pejlemetoder og pejlehyppighed.....	24
Pumpekapacitet.....	25
Prøvepumpningens varighed.....	25
Stigningsperioden.....	25
Korrektion af data.....	26
Barometereffekt.....	26
Partiel udnyttelse af det vandførende lag.....	27
Aftagende mægtighed af det vandførende lag.....	27
Analysemetoder.....	28
Boringens hydrauliske egenskaber.....	28
Grundvandsreservoirets hydrauliske egenskaber.....	30
Grundvandsreservoir med frit vandspejl.....	30
Tid-Sænkning.....	30
Semilogaritmisk afbildning.....	30
Logaritmisk afbildning.....	30
Afstand-Sænkning.....	33
Semilogaritmisk afbildning.....	33
Logaritmisk afbildning.....	34
Artesisk grundvandsreservoir.....	34
Tid-Sænkning.....	35
Semilogaritmisk afbildning.....	35
Logaritmisk afbildning.....	35
Afstand-Sænkning.....	36

Hydrologiske grænser.....	40
Anvendelse af de hydrauliske egenskaber.....	41
Praktiske eksempler.....	43
Måleinstrumenter.....	43
Boringens hydrauliske egenskaber.....	46
Hydrogeologiske forhold.....	46
Prøvepumpningsdata og beregninger.....	47
Jacob's metode.....	51
Rorabaugh's metode.....	51
Grundvandsreservoirets hydrauliske egenskaber.....	54
Reservoir med frit vandspejl.....	54
Sænkingsdata.....	54
Hydrogeologiske forhold.....	54
Korrektion for barometereffekt.....	55
Tid-Sænkning.....	56
Semilogaritmisk afbildning.....	56
Logaritmisk afbildning.....	59
Afstand-Sænkning.....	62
Semilogaritmisk afbildning.....	62
Logaritmisk afbildning.....	63
Stigningsdata.....	63
Hydrogeologiske forhold.....	63
Korrektion for aftagende mægtighed.....	67
Tid-Stigning.....	67
Logaritmisk afbildning.....	67
Afstand-Stigning.....	68
Semilogaritmisk afbildning.....	69
Logaritmisk afbildning.....	71
Artesisk grundvandsreservoir.....	76
Hydrogeologiske forhold.....	76
Tid-Sænkning.....	76
Semilogaritmisk afbildning.....	76
Logaritmisk afbildning.....	80
Afstand-Sænkning.....	82
Logaritmisk afbildning.....	82
Eksempler på anvendelse af de hydrauliske egenskaber.....	84
Sænkningen i pumpeboringen.....	84
Sænkningen i observationsboringerne.....	85
Nedsivning i form af lækage.....	87
Konklusion.....	89
Litteratur.....	90

FORORD

Nærværende publikation er med mindre ændringer og omredigeringer en genoptrykning af en tidligere publiceret fremstilling af samme emne i 3 numre af Vandteknik, december 1969, februar og april 1970. Den er desuden forsynet med engelsk abstract og engelsk tekst for symboler og illustrationer. Formålet med genoptrykningen er at give en samlet fremstilling over de hyppigst anvendelige metoder for undersøgelse og analyse af borer og grundvandsforekomster ved hjælp af prøvepumpning under forhold med ikke stationær grundvandsstrømning.

Direktøren for Danmarks Geologiske Undersøgelse, dr. phil. O. BERTHELSEN, takkes for tilladelse til publikation af dette arbejde. Redaktionen af Vandteknik takkes for tilladelse til genoptrykningen og overdragelse af en del klicheer. Måleresultater i forbindelse med de benyttede eksempler er opnået med værdifuld hjælp fra stadsingeniørens kontor i Vejle og Silkeborg, de grafiske fremstillinger er udarbejdet på DGU's tegnestue under ledelse af fru RIGMOR BORG, og manuskriptet er maskinskrevet af assistent, fru INGRID CHRISTENSEN, DGU.

For disse værdifulde assistancer bringer forfatterne deres tak og påskønnelse.

København, den 28. oktober 1970.

LARS JØRGEN ANDERSEN ZVONIMIR HAMAN

ABSTRACT

The purpose of this paper is to introduce the practical application of selected quantitative and analytical methods for testing wells and evaluation of aquifers to engineers and geologists within the field of groundwater hydrology in the Nordic countries. This abstract, a list of symbols and units and text of figures and tables in English may possibly provide understanding of the used formulas and methods for readers not familiar with Danish.

The increasing demand for ground water and the need for optimal utilization of aquifers accelerate the use of quantitative methods for predictions of available quantities of ground water and aquifer response on withdrawal.

The first part of this paper gives a short introduction into the developed theory for analysing drawdown data from pumping tests and a number of selected formulas in their developed form for determining the hydraulic properties of wells (B, C and n), aquifers, (T and S) and confining bed (P'). Selected hydrogeological terms are defined. The procedure of pumping and the frequency of waterlevel observations in space and time is briefly mentioned both for step-drawdown test and pumping test with constant capacity.

Formulas for adjustments of drawdown- and recovery data for barometric efficiency and decrease of saturated thickness are described. Examples of logarithmic and semi-logarithmic plots of data are given together with type curves for leaky artesian and water-table conditions.

Principles and formulas for prediction of the future drawdown in pumped wells and aquifers are outlined.

The second part of the paper gives the practical application of the selected analytical methods and formulas. Illustrative examples with actual field data collected by the Hydrogeological Department, Geological Survey of Denmark, are presented for each method discussed. Basic data as well drawdown as recovery from 4 pumping tests and their numerical and graphical analysis are presented in 27 figures and 16 tables.

SYMBOLFORKLARING – SYMBOLS AND UNITS

- A_L = Arealet af semipermeabelt lag med lækage, m^2 .
Area of confining bed through which leakage occurs, in metre square, m^2 .
- B = Bredden af det vandførende lag langs en ækvipotentiallinie (i forbindelse med formel (22)), m .
Width of aquifer normal to groundwater flow, in m (in formula (22)).
- B = Faktor for formationstab, $sek./m^2$.
Formation loss factor, in $sec./m^2$.
- BE = Barometereffekt, %.
Barometric efficiency, in per cent.
- C = Faktor for filtertab, $sek.^2/m^5$.
Well loss constant, in $sec.^2/m^5$.
- e = Grundtallet for den naturlige logaritme.
Base of natural logarithm.
- Δh = Potentialforskel i grundvandet i adskilte, over hinanden liggende reservoirer, m .
Difference between head in the aquifer and the source bed above the confining bed, in m .
- I = Den hydrauliske gradient, ‰.
Hydraulic gradient, in m per 1000 m .
- K_0 = Bessels funktion.
Bessel function.
- m = Den oprindelige mægtighed af det vandførende lag, m .
Initial saturated thickness of aquifer, in m .
- m' = Mægtigheden af et semipermeabelt lag med lækage, m .
Thickness of confining beds through which leakage occurs, in m .
- n = Eksponenten for turbulent strømning i forbindelse med en pumpeboring.
Exponent of turbulent flow.
- P = Lufttryk, mm kviksølv.
Atmospheric pressure, in mm of mercury.
- ΔP = Lufttrykændring, mm kviksølv.
Change in atmospheric pressure, in mm of mercury.

- P' = Den vertikale permeabilitet af semipermeabelt lag med lækage, m/sek.
Coefficient of vertical permeability of confining bed, in m/sec.
- Q = Den oppumpede vandmængde, $m^3/sek.$
Discharge, in $m^3/sec.$
- Q_L = Den del af den oppumpede vandmængde, som hidrører fra lækage, $m^3/sek.$
Discharge as leakage, in $m^3/sec.$
- r = Afstand fra pumpeboring til observationsboring, m.
Distance from pumped well to observation well, in m.
- r/B = Lækagefaktor.
Leakage factor.
- r/D = Faktor for forsinket vandafgivelse.
Factor of delayed gravity drainage.
- r_e = Radius i det påvirkede område, m.
Radius of area of influence, in m.
- r_m = Afstanden for et vilkårlig valgt punkt på en ret linie gennem punkter for afstand-sænkning eller afstand-stigning plottet på semilogaritmisk papir, m.
Arbitrarily chosen distance on a semilog plot, in m.
- r_w = Effektiv radius af pumpeboringen, m.
Effective radius of well, in m.
- s = Sænkning af vandstanden, m.
Drawdown, in m.
- Δs = Sænkning af vandstanden over en dekade ved semilogaritmisk afbildning, m.
Drawdown difference per log cycle, in m.
- s' = Residualsænkningen, m.
Residual drawdown, in m.
- s'' = Stigning af vandstanden efter stop af pumpning, m.
Recovery, in m.
- $\Delta s''$ = Stigningen efter stop af pumpning over en dekade ved semilogaritmisk afbildning, m.
Change in recovery per log cycle, in m.
- s_m = Korrigeret værdi for sænkning, m.
Adjusted drawdown, in m.
- s''_m = Korrigeret værdi for stigning efter stop af pumpningen, m.
Adjusted recovery, in m.
- s_w = Afsænkningen i pumpeboringen, m.
Drawdown in the pumped well, in m.
- S = Magasinkoefficient, brøk.
Storage coefficient, fraction.
- S_y = Specifik ydelse, brøk eller %.

- Specific yield, fraction or in per cent.*
- t = Tiden efter start eller stop af pumpning, min.
Time since pumping started or stopped, in minutes.
- t_0 = Tiden angivet ved skæringspunktet mellem en ret linie gennem punkter for tid-sænkning eller tid-stigning og tidsaksen for $s = 0$ eller $s'' = 0$ ved semilogaritmisk afbildning, min.
Intersection of straight-line slope with zero-drawdown axis, in minutes.
- t_m = Tiden for et vilkårlig valgt punkt på en ret linie gennem punkter for tid-sænkning eller tid-stigning ved semilogaritmisk afbildning, min.
Arbitrarily chosen time on a semilog plot, in minutes.
- t_{wt} = Tid for forsinket vandafgivelse, min.
Time since pumping started after which the effects of delayed gravity drainage cease to influence drawdown, in minutes.
- T = Transmissivitetskoefficient, m^2/sek .
Coefficient of transmissivity, in m^2/sec .
- u = $\frac{r^2 S}{4Tt}$
- $W(u)$ = »Boringsfunktionen« for værdier af (u) for artesiske grundvandsreservoirer.
“Well function” for values of (u) for non-leaky artesian conditions.
- $W(u, r/B)$ = »Boringsfunktionen« for værdier af (u) og (r/B) for artesiske grundvandsreservoirer med lækage.
“Well function” for values of (u) and (r/B) for leaky artesian conditions.
- $W(u_{ay}, r/D)$ = »Boringsfunktionen« for værdier af (u_{ay}) og (r/D) for grundvandsreservoirer med frit vandspejl.
“Well function” for values of (u_{ay}) and (r/D) for watertable conditions.
- ΔW = Vandstandsændring frembragt af lufttrykændring, cm.
Change in water level resulting from change in atmospheric pressure, in centimetres of water column.
- α = Indeks for forsinket vandafgivelse i min.
“Delay index”, in minutes.

INDLEDNING

Det voksende behov for vand til alle formål og især behovet for grundvand har bevirket, at det er nødvendigt, at vore grundvandsforekomster kortlægges og udnyttes optimalt, hvis det i fremtiden skal blive muligt at tilfredsstille dette behov.

For at bestemme et grundvandsreservoirs optimale ydelse er det udover kendskabet til infiltrationens størrelse m.v. nødvendigt at kende en lang række egenskaber og forhold ved grundvandsreservoiret, først og fremmest reservoirtypen, reservoirets hydrauliske egenskaber og dets rumlige udstrækning.

Kendskabet til de geologiske forhold kan fås gennem kortlægning af eksisterende borer, geofysisk kortlægning og udførelse af undersøgelsesboringer i området.

Grundvandsreservoirets hydrauliske egenskaber bestemmes ved prøvepumpning på borer med samtidig pejling af grundvandsspejlet eller – under artesiske forhold – grundvandets trykniveau i pumpeboringen og omliggende observationsboringer.

Prøvepumpning af en boring eller et vandførende lag kan udføres på mange måder, men formålet med enhver prøvepumpning er at få oplysning om, hvilke vandmængder der vil kunne indvindes af den pågældende boring eller grundvandsreservoir.

De informationer, som observationerne i forbindelse med prøvepumpningen giver om grundvandsreservoiret og dets egenskaber, er afhængige af, hvordan, hvor hyppigt og hvor omhyggeligt de udføres.

Rigtigt udførte målinger muliggør anvendelsen af kvantitative beregningsmetoder, gennem hvilke det er muligt at forudsige den fremtidige afsenkning, den optimale placering og den optimale kapacitet af indvindingsboringerne.

Formålet med denne publikation er at give en oversigt over nogle af de vigtigste metoder til analysering af måleresultater fra prøvepumpning af et grundvandsreservoir under ikke stationære strømningsforhold samt at give den hydrogeologiske baggrund for de ret strenge krav, der stilles til måleresultater, der skal benyttes ved disse analysemetoder. Endelig vil der blive vist en række praktiske eksempler på, hvorledes man bestemmer et grundvandsreservoirs hydrauliske egenskaber ved disse metoder.

Det forhold, at disse metoder de sidste 35 år har vist deres anvendelighed verden over, specielt i lande hvor grundvandssituationen har været kritisk, har bevirket, at forfatterne har introduceret metoderne her i landet og benyttet

dem i forbindelse med prøvepumpninger, som Hydrogeologisk Afdeling ved Danmarks Geologiske Undersøgelse har udført for danske vandværker de seneste år.

Forståelsen af den teoretiske baggrund for udviklingen af metoderne kræver et omfattende kendskab til den højere matematik. Imidlertid vil det i praksis være relativt let at anvende disse metoder i den form, hvori de her præsenteres.

De forskellige metoder, som er omtalt i den teoretiske del, belyses ved eksempler fra udførte prøvepumpninger. Eksemplerne kommer i samme rækkefølge som metoderne i den teoretiske del. Af pladshensyn vil omtalen af de geologiske forhold blive begrænset til et boreprofil for pumpeboringerne og en kortfattet beskrivelse af det prøvepumpede grundvandsreservoirs hydrogeologiske forhold samt visse tekniske og geologiske data for observationsboringerne i tabelform. De præsenterede eksempler er eksempler på de hyppigst anvendte metoder for beregning af et grundvandsreservoirs hydrauliske egenskaber. Der findes imidlertid en lang række metoder for specielle reservoirbetingelser, som ikke forekommer så hyppigt, at det vil være berettiget at medtage dem i denne forbindelse.

Den praktiske illustration er endvidere begrænset til eksempler på enkeltprøvepumpninger i forskellige reservoirtyper. En fuldstændig prøvepumpningsundersøgelse af en grundvandsforekomst består af en række sådanne enkelt-pumpninger med pejlinger i omliggende boringer, og omfanget af data og beregninger fra en sådan undersøgelse vil være så omfattende, at det ikke har været muligt at give dem her.

Derfor er eksemplet på anvendelsen af grundvandsreservoirs hydrauliske egenskaber begrænset til et tilfælde med pumpning på en enkelt boring og beregning af den fremtidige sænkning af vandspejlet i denne og i omliggende observationsboringer til forskellige tidspunkter.

TEORETISK DEL

HISTORISK UDVIKLING

Inden for feltet geohydrologi og hydrogeologi er der sket meget betydelige fremskridt, siden DARCY i 1856 opstillede sin velkendte formel for vandets bevægelse gennem porøse lag, og siden DUPUIT senere anvendte den inden for boringshydraulikken. THIEM, SLICHTER, MUSKAT, WENZEL o.a. har udviklet formler, som i overvejende grad enten er modificerede eller specielle tilfælde af Dupuits formel.

Disse metoder kan alle karakteriseres som »ligevægts-metoder«, som kun kan anvendes under stationære strømningsbetingelser, under hvilke der ikke sker ændring i sænkningen som funktion af tiden.

Et betydeligt fremskridt i boringshydraulikken blev gjort, da THEIS i 1935 udviklede sin »ikke-ligevægts-formel«. Han opstillede og udviklede sin formel ud fra analogien mellem vands bevægelse gennem et vandførende lag og varmens bevægelse gennem et varmeledende legeme. Med denne formel var THEIS den første, som indførte tidsfaktoren og magasinkoefficienten i grundvands-hydraulikken, og det skal pointeres, at fordelingen ved Theis' formel er, at den muliggør beregning af et grundvandsreservoirs hydrauliske egenskaber, T og S, og dermed den fremtidige afsenkning efter en vilkårlig pumpeperiode og i en vilkårlig afstand fra pumpeboringen.

Theis' formel i sin non-dimensionale form

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \int_0^\infty \frac{e^{-u} du}{u}, \quad (1)$$

er vanskelig at løse direkte på grund af dens komplekse matematiske form.

Det eksponentielle integral i Theis' formel erstattes derfor med en såkaldt »boringsfunktion« $W(u)$, hvorefter den har formen

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u), \text{ i m} \quad (2)$$

hvor
$$u = \frac{r^2 S}{4Tt}, \quad (3)$$

s = afsenkning af vandstanden i m.

Q = oppumpet, konstant vandmængde, m^3/sek .

T = transmissiviteten, m^2/sek .

$W(u)$ = »boringsfunktionen«.

r = afstand fra pumpeboring til observationsboring, i m.

S = magasinkoefficienten, (dimensionsløs).

t = tiden i sek. siden start af pumpning.

Det eksponentielle integral kan omskrives til en konvergent serie, fra hvilken værdier for funktionen $W(u)$ for u er beregnede og foreligger i tabelform (WENZEL, 1942).

THEIS foreslog imidlertid en grafisk løsning til WENZEL og JACOB, som afbildede værdier af $W(u)$ for u på dobbelt logaritmisk papir som en typekurve. Denne typekurve samt en metode for superposition (se senere) over en datakurve er en almindelig anvendt procedure for bestemmelsen af de hydrauliske egenskaber i et grundvandsreservoir.

På basis af Theis' formel og dens grafiske løsning har en lang række forfattere afledt formler og grafiske løsningsmetoder for bestemmelse af et grundvandsreservoirs hydrauliske egenskaber for specielle reservoirbetingelser, f.eks. tilstrømning gennem svagt permeable lag, tilstedeværelsen af hydrologiske grænser, borerer med filter i en del af det vandførende lag etc.

Alle disse metoder er baseret på følgende generelle forudsætninger:

1. at grundvandsreservoiret er homogent og isotropt,
2. at grundvandsreservoiret er af uendelig udstrækning,
3. at pumpeboringen modtager vand fra den fulde mægtighed af det vandførende lag,
4. at transmissivitetskoefficienten er konstant til alle tider og på alle steder,
5. at boringen har en uendelig lille diameter,
6. at vandet, som afgives fra magasinet, afgives momentant og i overensstemmelse med afsænkningen.

Der vil endvidere i forbindelse med en følgende omtale af former for specielle reservoirtyper blive tilføjet supplerende betingelser.

Til trods for disse meget restriktive forudsætninger for anvendelsen af Theis' formel og derivater heraf har det vist sig, at formlerne kan finde anvendelse i praksis med godt resultat til løsning af en lang række spørgsmål i forbindelse med analyse af grundvandsreservoirer.

Forudsætningen for brugen af disse metoder er imidlertid, at de benyttes med assistance af eksperter, der har tilstrækkelig viden om såvel brugen af formlerne som de hydrogeologiske forhold i det undersøgte grundvandsområde, til at afgøre i hvor høj grad de naturlige betingelser, hvorunder metoderne anvendes, er i overensstemmelse med de betingelser, hvorunder de er opstillet.

NOGLE HYDROGEOLOGISKE BEGREBER

I den følgende fremstilling af analysemetoder og bearbejdning af prøvepumpningsdata vil det blive nødvendigt at anvende en række hydrogeologiske udtryk, hvoraf nogle ikke må anses for at være almen kendte, hvorfor en forklaring vil blive givet forinden.

Typer på grundvandsreservoirer

Grundvandsreservoirer kan opdeles i grundvandsreservoirer med frit grundvandsspejl og artesiske grundvandsreservoirer.

Et grundvandsreservoir med frit grundvandsspejl er et reservoir, i hvilket grundvandsspejlet udgør den øvre grænse for den mættede zone med direkte forbindelse gennem den overliggende umættede zone til atmosfæren.

Et artesiske grundvandsreservoir, eller et trykvandsreservoir, forekommer, hvor grundvandet er under større tryk end atmosfæretrykket som følge af overliggende, svagt permeable eller impermeable lag, og hvor grundvandets trykniveau er beliggende over underkanten af det svagt permeable lag.

Artesiske grundvandsreservoirer kan være omgivet af svagt permeable lag, som ikke er fuldstændig tætte. Sådanne artesiske grundvandsreservoirer vil vi betegne som lække, artesiske grundvandsreservoirer. Ved pumpning fra et sådant reservoir vil faldet i trykniveau i reservoiret bevirke, at der sker en tilstrømning af vand gennem eller fra de omgivende svagt permeable lag. Denne indsvivning af vand fra omgivelserne betegnes »lækage«.

Transmissiviteten (T)

Transmissiviteten er et mål for permeabiliteten af det vandførende lag og lig med permeabilitetskoefficienten multipliceret med det vandførende lags mægtighed i m. Den får derfor enheden $m^3/m/sek.$ eller $m^2/sek.$ Transmissiviteten af et grundvandsreservoir kan defineres som den vandmængde, der pr. tidsenhed strømmer gennem et 1 m bredt vertikalt tværsnit af det vandførende lag under en hydraulisk gradient på 100% eller 1 m pr. m.

Magasinkoefficienten (S)

Magasinkoefficienten S for et artesiske grundvandsreservoir defineres som rumfanget af den vandmængde, det afgiver eller tager ind i magasinet i en vertikal

søjle med et tværsnit på 1 m² gennem hele det vandførende lag ved et fald eller en stigning i grundvandspotentiallet på 1 m. Det fremgår af denne definition, at magasinkoefficienten er dimensionsløs. Den er almindeligvis af størrelsesordenen 10⁻³–10⁻⁵. Den er et mål for kompressionen af såvel grundvandet som det vandførende lag.

Specifik ydelse (S_y)

Ved frie grundvandsreservoirer betegnes magasinkoefficienten som den specifikke ydelse, der defineres som den vandmængde, det vandførende lag efter fuld mætning ved fri dræning afgiver pr. volumenenhed. Denne størrelse kaldes også den effektive porøsitet, og den er af størrelsesordenen 10–30%.

Lækage

Ved lækage forstås den vandmængde, som tilføres et artesisk vandførende lag gennem eller fra over- eller underliggende svagt permeable lag. Lækage kan også betegnes som den vertikale permeabilitet i disse, og den måles i m/sek.

Forsinket vandafgivelse

Ved forsinket vandafgivelse forstås differencen mellem specifik ydelse og den vandmængde, som et vandførende lag momentant afgiver ved fri dræning. Effekten af forsinket vandafgivelse formindskes med forøget pumpeetid.

Hydrologiske grænser

Vandførende lag kan i horisontal retning have to slags grænser.

En negativ hydrologisk grænse er en grænseflade, gennem hvilken der ikke sker nogen strømning, d.v.s. en impermeabel grænse (vandstandsede lag).

En positiv hydrologisk grænse er en grænse langs hvilken, sænkningen er 0, d.v.s. som ikke passeres af sænkningstragten. En sådan grænse findes, hvor overfladevand (vandløb, søer o.l.) står i hydraulisk forbindelse med det vandførende lag.

En negativ hydrologisk grænse vil forøge afsænkningens størrelse, og en positiv hydrologisk grænse vil formindskes afsænkningen, når sænkningstragten når ud til grænsen.

Imaginære boringer

En imaginær boring er en hypotetisk boring, som indføres for at simulere virkningen af en hydrologisk grænse.

Virkningen af en negativ hydrologisk grænse kan erstattes af en imaginær boring placeret på modsat side af grænsen og i samme afstand fra denne som

pumpeboringen, og som pumpes med samme kapacitet som den virkelige pumpeboring.

Virkningen af en positiv hydrologisk grænse kan erstattes af en imaginær boring placeret på samme måde som ovenfor beskrevet, men ned i hvilken der pumpes en vandmængde af samme størrelse som den, der oppumpes fra den virkelige boring.

Barometereffekt

Ved barometereffekt i et grundvandsreservoir forstås forholdet mellem en lufttrykændring og den deraf fremkaldte vandstandsændring i en artesiske boring. Dette forhold udtrykkes almindeligvis i procent. I grundvandsreservoirer med frit vandspejl er barometereffekten 0, mens den i artesiske reservoirer kan variere mellem 0 og 100%.

Partiel udnyttet boring

Ved en partiel udnyttet boring forstås en boring til hvilken tilstrømning af grundvand kun sker fra en del af det vandførende lag.

Afsækning

Ved afsækning eller sænkning af vandstanden i en boring forstås forskellen mellem ro-vandstanden og vandstanden under pumpning fra boringen selv eller andre borer.

Residualsækning

Ved residualsækningen forstås forskellen mellem rovandspejlet og vandspejlet til ethvert tidspunkt efter stop af pumpning.

Vandstandsstigning

Ved vandstandsstigningen forstås forskellen mellem vandstand ved stop af pumpning og den til ethvert senere tidspunkt eksisterende vandstand.

Beregnet vandstandsstigning

Ved den beregnede vandstandsstigning forstås forskellen mellem den målte vandstand og den vandstand, som ville være opnået, hvis pumpningen var fortsat til måletidspunktet.

Typekurve

Ved en typekurve forstås en grafisk afbildning af en funktion med veldefinerede forudsætninger. Inden for grundvandshydraulikken findes en lang række typekurver, hvoraf en del vil blive præsenteret her.

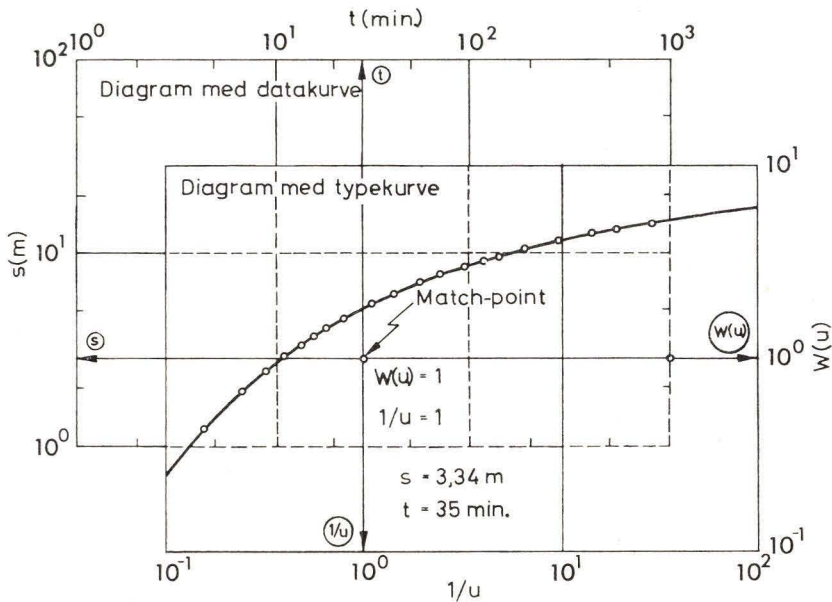


Fig. 1. Princippet for superposition af en typekurve over en hypotetisk datakurve med aflæste værdier for koordinater til det valgte Match-point.

Fig. 1. The principle of superposition of a type curve over a hypothetical data curve and the co-ordinates of the chosen Match-point.

Datakurve

Ved en datakurve forstås en grafisk afbildning af måleresultater fra prøvepumpningsforsøg i et koordinatsystem med samme målestok som det, i hvilket den tilsvarende typekurve er afbildet.

Procedure for superposition (se fig. 1)

Ved superposition af en typekurve på en tilsvarende datakurve anbringes typekurven over datakurven på en sådan måde, at de to kurver dækker hinanden på en så stor strækning som mulig, når de to sæt koordinataksler holdes parallelle.

Match-point (Fælles skæringspunkt)

Et match-point er et vilkårligt valgt punkt under superpositionen af de to kurver, hvis koordinater på såvel typekurve som datakurve benyttes ved beregning af de hydrauliske egenskaber for det grundvandsreservoir, som datakurven repræsenterer.

Semilogaritmisk afbildning

Ved semilogaritmisk afbildning forstås en afbildning af måledata i et koordinatsystem, hvor abscisseaksen har logaritmisk inddeling og ordinataksen en lineær inddeling.

Logaritmisk afbildning

Ved en logaritmisk afbildning forstås en afbildning i et koordinatsystem, hvor begge akser har en logaritmisk inddeling.

I de to koordinatsystemer benyttes ordinataksen til afbildning af data for sænkningen og abscisseaksen enten til afbildning af tilsvarende tidspunkter eller afstande.

UNDERSØGELSE AF EN KILDEPLADS

Når tilstrækkelige data vedrørende de geologiske, hydrologiske og tekniske forhold inden for et grundvandsområde foreligger, vil placeringen af kildepladsen kunne fastlægges.

Fremgangsmåden ved undersøgelse af selve kildepladsen afhænger af, om der allerede foregår en indvinding fra området, eller om det er et nyt indvindingsområde, der skal undersøges.

NYT INDVINDINGSOMRÅDE

Den nærmere placering af indvindingsboringerne, deres antal og indbyrdes afstand samt de nødvendige observationsboringer vil afhænge af reservoirtypen.

Ved et grundvandsreservoir med frit grundvandsspejl skal observationsboringerne placeres i relativ kort afstand fra pumpeboringen, mens de i et artesiske grundvandsreservoir skal placeres i større afstand. Forklaringen på dette forhold fremgår af magasinkoefficientens størrelse ved de to reservoirtyper samt af det kendte forhold, at sænkningen gange magasinkoefficienten summeret over det påvirkede område er lig med den oppumpede vandmængde. Ved frie grundvandsreservoirer er magasinkoefficienten (specifik ydelse) mange gange større end ved artesiske reservoirer. Derfor bliver det påvirkede område lige så mange gange mindre ved det frie som ved det artesiske grundvandsreservoir.

Uanset reservoirtype skal der i tilknytning til den første undersøgelsesboring (pumpeboring) placeres mindst 2 observationsboringer i retninger vinkelret på hinanden. Boringen prøvepumpes og den næste undersøgelsesboring placeres derefter i overensstemmelse med prøvepumpningsresultatet fra den første, og hver følgende undersøgelsesboring placeres i overensstemmelse med prøvepumpningsresultaterne for alle tidligere boringer.

Ud fra det første prøvepumpningsresultat vil det ofte kunne afgøres, hvilken procedure og analysemetode der skal anvendes ved den videre undersøgelse af kildepladsområdet. Viser de første resultater, at de hydrogeologiske forhold synes at være ukomplicerede, vil den videre fremgangsmåde i undersøgelsen blive mindre omfattende, d. v. s. at antallet af undersøgelsesboringer og observationsboringer kan nedskæres. Hvis undersøgelsesresultaterne derimod tyder på, at området har en kompliceret hydrogeologisk opbygning, vil dette medføre, at flere pumpe- og observationsboringer bør udføres, og at flere prøvepumpninger må foretages. Faktorer, som kan komplicere undersøgelsen, er blandt

andre: begrænsning af det vandførende lags udstrækning, d. v. s. tilstedeværelsen af hydrologiske grænser, eller variation i mægtigheden og sammensætningen af det vandførende lag inden for det påvirkede område.

Når man finder, at der foreligger tilstrækkelige oplysninger om grundvandsreservoirets hydrauliske egenskaber og udstrækning, vil det være muligt ved benyttelse af analysemetoder, som vil blive omtalt senere, at projekttere beliggenheden af de fremtidige indvindingsboringer på en sådan måde, at den beregnede ydelse bliver optimal i forhold til afsenkningen i de enkelte boringer.

EKSISTERENDE INDVINDINGSOMRÅDE

Ved udvidelse af indvindingen fra et allerede udnyttet område vil fremgangsmåden være den, at virkningerne fra den eksisterende indvinding må elimineres før yderligere undersøgelser i form af prøvepumpning kan gennemføres. Dette kan enten ske ved, at oppumpningen gøres konstant i så lang tid, at fluktuationer i grundvandsstanden ud over de naturlige ophører, eller ved totalt stop af oppumpningen i så lang tid, at der etableres en stationær vandstand. Dette sidste er almindeligvis ikke praktisk muligt.

Alle eksisterende pumpeboringer vil derefter kunne benyttes som observationsboringer under prøvepumpning af hver enkelt boring.

Såfremt de derved fundne værdier af de hydrauliske egenskaber viser, at en større vandmængde vil kunne indvindes fra området, vil nye indvindingsboringer kunne projekteres på basis af de indhøstede resultater. Hver af disse bør efter deres udførelse prøvepumpes på samme måde som tidligere nævnt.

Ved undersøgelse i områder med eksisterende indvinding må man imidlertid gøre sig klart, at de foreliggende oplysninger om de geologiske, hydrogeologiske og tekniske forhold ofte er utilstrækkelige. Endvidere er det ofte vanskeligt at udføre pejling af vandstanden på grund af for trange pladsforhold i pumpeboringerne. Dette, sammen med det forhold, at ændringer i pumpekapaciteten i de enkelte boringer vil medføre forholdsvis stor variation i vandspejlet, bevirker, at de opnåede resultater må tages med langt større forbehold end i områder, hvorfra der ikke sker indvinding samtidig med, at undersøgelserne gennemføres.

MÅLINGER FØR START AF PRØVEPUMPNING

I områder uden vandindvinding vil observation af vandstanden i eksisterende pejleboringer være påkrævet i mindst 1 à 2 uger, før prøvepumpningen påbegyndes. Dette er nødvendigt for at fastslå eventuel tilstedeværelse af barometereffekt samt påvirkning fra en eventuel ikke kendt oppumpning i nærheden.

I områder med eksisterende vandindvinding er det som tidligere nævnt nødvendigt at etablere konstant oppumpning fra de eksisterende pumpeboringer.

Pejling af vandstanden kan ske enten ved enkeltpejlinger 2–3 gange dagligt eller ved anvendelse af registrerende vandstandsmålere. Ud over registreringen af vandstanden vil det tillige være påkrævet, at lufttrykket måles kontinuert.

Forinden prøvepumpningen kan påbegyndes, vil det være nødvendigt at drage omsorg for, at den oppumpede vandmængde kan måles, samt at den kan bortledes, således at en reinfiltration til grundvandsreservoiret er udelukket.

PRØVEPUMPNINGSPROCEDURE

PEJLEMETODER OG PEJLEHYPPIGHED

Under prøvepumpning bør vandstanden måles i såvel pumpeboring som observationsboring enten ved hyppige enkeltpejlinger eller med registrerende vandstandsmålere. Det er en selvfølge, at alle boringer må være pejlbare. Når håndpejling benyttes, kræver dette en observatør for hver boring i de første 3 timer af pumpningen, men hvor det er muligt, anbefales det at benytte registrerende vandstandsmålere, idet dette ikke blot sparer mandskab, men det giver en langt bedre registrering af vandstandssænkningen under prøvepumpningen. En forudsætning for benyttelse af vandstandsmålere er, at observationsboringerne har en diameter på mindst 4". Ved benyttelse af vandstandsmålere skal anvendes daglig skala de første 3 timer af prøvepumpningen, hvorved det er muligt at aflæse tiden med en nøjagtighed på 3½ minut. Derefter kan skalaen ændres til ugeskala, hvorved tiden kan aflæses med en nøjagtighed på ½ time. Ved pumpning ud over en uges varighed kan tidsskalaen ændres til månedskala, hvorved tiden kan aflæses med 2 timers nøjagtighed. De nævnte tidsskalaer giver fuld tilstrækkelig nøjagtighed for senere dataaflæsning fra vandstandsdiagrammerne, og vandstandskurverne giver desuden et visuelt billede af sænkingsforløbet.

Umiddelbart før prøvepumpningen standses, skal tidsskalaen påny ændres fra månedsskala til dagskala, ugeskala og månedsskala.

Pejlehyppigheden ved håndpejling i pumpeboringen og i alle observationsboringer, som ikke er forsynet med registrerende vandstandsmålere, bør almindeligvis være som følger:

Periode efter start eller stop af pumpning	Måleinterval
0 – 10 min.	1 min.
10 – 20 -	2 -
20 – 40 -	5 -
40 – 60 -	10 -
60 – 90 -	15 -
90 – 180 -	30 -
180 – 360 -	60 -
360 – 600 -	120 -
10 – 24 timer	4 timer
1 – 3 døgn	6 -
3 døgn og derover	12 -

Grundvandsreservoirets type og afstanden fra pumpeboringer til observationsboringerne vil imidlertid være bestemmende for, om en anden pejlehyppighed kan benyttes. Generelt kan anføres, at grundvandsreservoirer med frit vandspejl tillader pejling med større intervaller, mens artesiske reservoirer kræver stor pejlehyppighed, men pejlehyppigheden vil kunne varieres fra tilfælde til tilfælde.

PUMPEKAPACITET

Pumpekapaciteten skal under hele prøvepumpningsperioden holdes så konstant som muligt. Mindre ændringer som følge af ændringer i energitilførslen vil dog kunne tolereres. Boringen bør prøvepumpes med en kapacitet så stor som mulig.

PRØVEPUMPNINGENS VARIGHED

Varigheden af prøvepumpningen vil være afhængig af reservoirbetingelserne. I artesiske reservoirer uden hydrologiske grænser vil en pumpetid på fra 1–3 døgn almindeligvis være tilstrækkelig. Hvis hydrologiske grænser forekommer inden for et tidsrum af 1 døgn fra pumpningens begyndelse, bør pumpningen fortsættes, indtil alle hydrologiske grænser har vist sig. Hvorledes det er muligt ud fra pejlingerne at konstatere tilstedeværelsen af en hydrologisk grænse vil blive omtalt senere.

Ved prøvepumpning af grundvandsreservoirer med frit vandspejl er pumpe-tiden længere end for artesiske reservoirer, og pumpningen bør fortsættes, indtil indflydelsen af den forsinkede vandafgivelse er ophørt. I grundvandsreservoirer med frit vandspejl vil fjerne hydrologiske grænser være vanskelige at afsløre, selv ved en meget langvarig prøvepumpning. Kendskabet til udbredelsen af det vandførende lag vil derfor være af afgørende betydning for den fremtidige sænk-ningsprognose i grundvandsreservoirer med frit vandspejl.

STIGNINGSPERIODEN

Ved stop af pumpning vil data fra pejling af vandstandsstigningen også kunne benyttes ved beregningen af det vandførende lags hydrauliske egenskaber. I visse tilfælde vil stigningsdata endog give et bedre resultat end sænkingsdata, fordi de mindre uregelmæssigheder i pumpekapaciteten, som ofte forekommer under pumpningen, ikke influerer på forløbet af vandstandsstigningen efter pumpningens stop.

KORREKTION AF DATA

Når alle data fra pumpeperioden og stigningsperioden er indsamlet og tabelleret, skal de om nødvendigt korrigeres for ikke relevant påvirkning, forinden de kan benyttes for beregning af grundvandsreservoirets hydrauliske egenskaber.

BAROMETEREFFEKT

Som omtalt tidligere kan ændringer i lufttrykket medføre ændringer i vandstanden i en boring i et artesiske grundvandsreservoir. Sådanne påvirkninger kan under visse omstændigheder også forekomme i grundvandsreservoirer med frit grundvandsspejl, hvor den umættede del af det vandførende lag er dækket af et vandstandsende lag. Dette er f.eks. tilfældet ved grundvandsforekomster ved Vejle og Fredericia.

Ved sammenligning af vandspejlets ændringer med lufttrykkets kan barometereffekten i et iøvrigt upåvirket reservoir beregnes. Hvis der pumpes fra reservoiret, må stationære vandstandsforhold være opnået, forinden barometereffekten kan beregnes.

Følgende formel kan benyttes ved korrektion af vandstandsobservationer for barometereffekt:

$$BE = \frac{\Delta W \times 100}{\Delta P \times 1,36}, \% \quad (4)$$

Korrektionen af vandstanden i et reservoir med kendt barometereffekt kan ske ved hjælp af formlen:

$$\Delta W = \frac{BE \times \Delta P \times 1,36}{100}, \text{ cm} \quad (5)$$

hvor ΔW = vandstandsændring i cm
 ΔP = lufttrykændring i mm Hg
 BE = barometereffekt i %

Ved lufttrykændring i forbindelse med stigende lufttryk vil den målte vandstand være for lavt beliggende, hvorfor korrektionen skal adderes til den målte vandstandskote og modsat ved lufttrykændring i forbindelse med faldende lufttryk.

Det vil senere blive vist, at barometereffekten totalt kan tilsløre vandstandsændringer under en prøvepumpning, specielt når afsænkningshastigheden er lille, som tilfældet er i den senere del af et pumpeforsøg. Anvendelse af ikke korrigerede data fra grundvandsreservoirer med barometereffekt vil derfor ikke kunne benyttes eller i givet fald føre til ganske fejlagtige resultater.

PARTIEL UDNYTTELSE AF DET VANDFØRENDE LAG

I mange tilfælde sker tilstrømning til en boring kun fra en del af det vandførende lag, enten fordi boringen kun er udbygget med filter i en del af dette, eller fordi det vandførende lag ikke er gennemboret. Dette vil influere på afsænkningen eller stigningen i såvel pumpeboring som observationsboringer. Pejledata fra boringer med partiel filterinterval må derfor korrigeres for korrekt beregning af de hydrauliske egenskaber T og S .

Afhængig af den indbyrdes placering af filterintervallerne i pumpe- og pejleboring benyttes forskellige metoder til denne korrektion. Metoderne er dog ens for de to reservoirtyper.

AFTAGENDE MÆGTIGHED AF DET VANDFØRENDE LAG

Korrektion for aftagende mægtighed af den mættede zone i det vandførende lag skal foretages, når afsænkningen er stor i forhold til den mættede zones mægtighed. Dette gælder især, når det vandførende lag har en lille mægtighed. I så fald vil brugen af ikke korrigerede data føre til for små værdier af T . I tilfælde af, at sænkningen kun udgør en ringe del af det vandførende lags mægtighed, er korrektion unødvendig.

Følgende formler kan anvendes for korrektion for aftagende mægtighed af den mættede zone under en prøvepumpning:

$$s_m = s - \frac{s^2}{2m}, \text{ m} \quad (6)$$

hvor s_m = korrigeret værdi for sænkning
 s = den målte sænkning
 m = den oprindelige mægtighed af den mættede del af det vandførende lag.

Lignende korrektioner kan foretages ved anvendelse af data fra stigningen af vandspejlet efter en prøvepumpning.

ANALYSEMETODER

Ved en prøvepumpning må man udover bestemmelsen af grundvandsreservoirets hydrauliske egenskaber tillige skaffe sig viden om den enkelte pumpeborings hydrauliske karakteristika, idet en af hovedkomponenterne i prognosen for den fremtidige afsenkning er at forudsige den sænkning, som pumpeboringen selv afstedkommer. Den anden komponent i den fremtidige prognose for afsenkningen er at forudsige den indbyrdes påvirkning mellem indvindingsboringerne.

BORINGENS HYDRAULISKE EGENSKABER

Bestemmelse af boringens hydrauliske egenskaber er en forudsætning for at kunne beregne den optimale kapacitet af boringen. Dette kan gøres ved hjælp af prøvepumpning med trinvis varieret kapacitet. Fremgangsmåden består i, at pumpningen på boringen sker ved trinvis at øge kapaciteten, idet der pumpes med konstant vandmængde for hvert trin. Varigheden af hvert trin er almindeligvis 1 time og antallet af trin oftest 3–5.

Tid, sænkingsdata og kapacitet for hvert trin måles, tabelleres og afbildes grafisk på semilogaritmisk eller lineært papir.

Følgende formler for beregning af boringens hydrauliske egenskaber kan benyttes:

$$s_w = BQ + CQ^2, \text{ m (JACOB),} \quad (7)$$

eller: $s_w = BQ + CQ^n, \text{ m (RORABAUGH),} \quad (8)$

hvor: s_w = afsenkningen i pumpeboringen i m,
 B = faktor for det vandførende lags modstand mod strømmingen, formationstab, som varierer med tiden, sek/m²,
 C = faktor for filtretabet, som afhænger af strømningsbetingelserne i boringens umiddelbare nærhed, indstrømningsmodstand i filteret og aksial strømningsmodstand i filter og boring. C varierer ikke med tiden inden for korte perioder, sek²/m⁵,
 n = eksponent for turbulent strømning.

Forskellen mellem de to formler består i den måde, på hvilken B , C og n bestemmes grafisk.

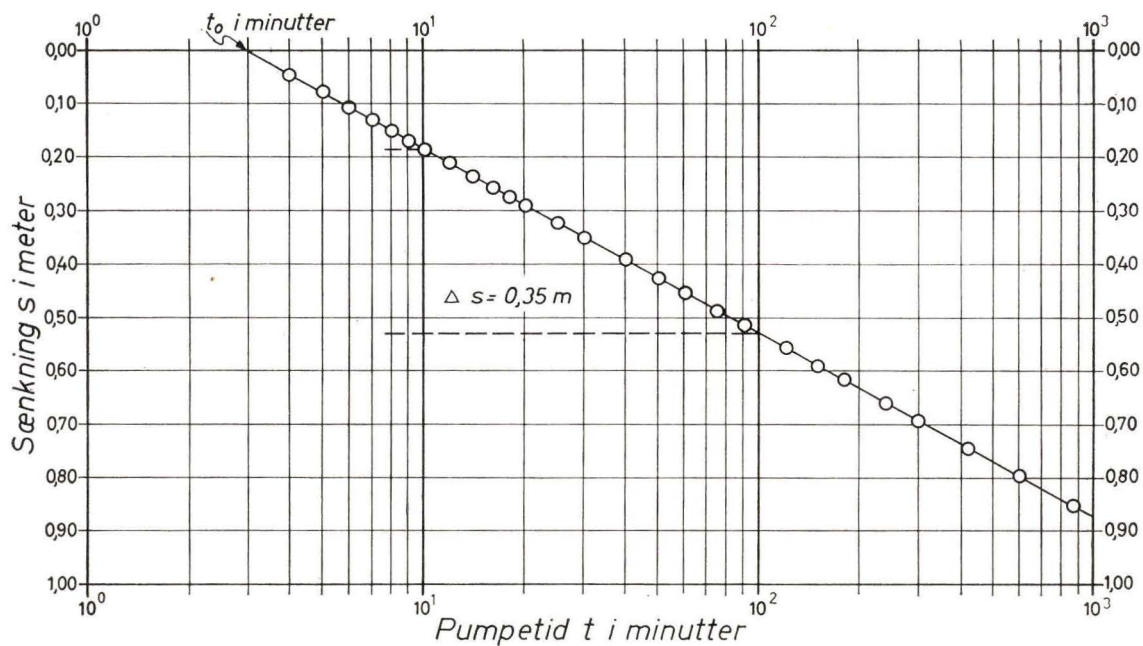


Fig. 2. Semilogaritmisk afbildning af prøvepumpningsdata for tid og sænkning i en boring.
 Fig. 2. Semilogarithmic plot of time-drawdown data.

Nødvendige komponenter for bestemmelsen af B, C og n er den specifikke sænkning s_w/Q , som plottes for tilsvarende værdier af Q for hvert trin, hvorefter parametrene B, C og n beregnes ad grafisk vej. Begge grafiske metoder vil senere blive illustreret i afsnittet med praktiske eksempler.

Når C og n er bestemt, kan B erstattes med en simplificeret Theis-ligning:

$$s_w = \frac{Q}{4\pi T} \left[2,3 \log_{10} \left(\frac{4Tt}{r_w^2 S} \right) - 0,577 \right] + \begin{matrix} CQ^2 \\ \text{eller } m \\ CQ^n \end{matrix} \quad (9)$$

hvor: r_w = effektiv radius af boringen (i mange tilfælde lig med boringens radius)
 og de øvrige symboler som tidligere angivet.

GRUNDVANDSRESERVOIRETS HYDRAULISKE EGENSKABER

Metoder for bestemmelse af et grundvandsreservoirs hydrauliske egenskaber er forskellige ved grundvandsreservoirer med frit vandspejl og artesiske reservoirer.

Grundvandsreservoirer med frit vandspejl

Efter at pejleresultaterne fra en prøvepumpning i et grundvandsreservoir med frit grundvandsspejl eventuelt er korrigeret som ovenfor angivet, kan de plottes, dels som tid-sænkning og dels som sænkning-afstand enten på semilogaritmisk eller dobbeltlogaritmisk papir med henblik på beregning af de hydrauliske egenskaber.

TID-SÆNKNING

Semilogaritmisk afbildning

På semilogaritmisk papir plottes tiden på den logaritmiske akse og sænkningen på den lineære akse (se fig. 2). Igennem de fremkomne punkter trækkes en ret linie, hvis hældning bestemmes som sænkningen over en dekade. Denne indsættes i formlen:

$$T = \frac{0.183 Q}{\Delta s}, \text{ m}^2/\text{sek.} \quad (10)$$

hvorved T kan beregnes, hvorefter S beregnes af formlen:

$$S = \frac{135 T t_0}{r^2}, \quad (11)$$

hvor

Δs = sænkningen over 1 dekade, i m,

t_0 = tiden angivet ved skæringspunktet mellem den rette linie gennem punkterne og tidsaksen for sænkningen lig med 0,

r = afstanden mellem pumpeboring og observationsboring, og de øvrige symboler som tidligere angivet.

Logaritmisk afbildning

Data for tid-sænkning i de enkelte observationsboringer plottes på dobbeltlogaritmisk papir, hvorved man får en såkaldt datakurve (se fig. 3). En type-

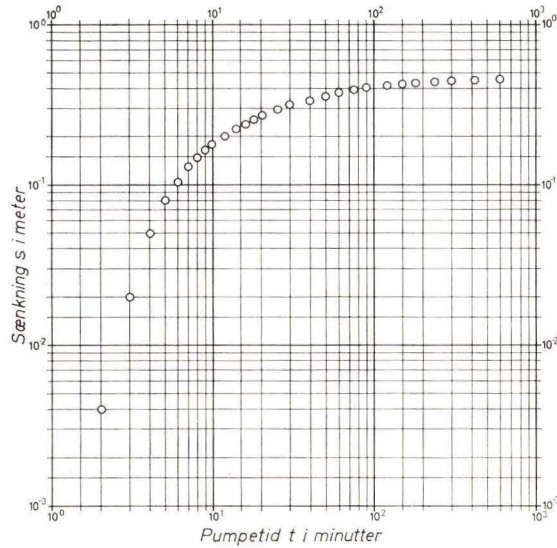


Fig. 3. Datakurve for logaritmisk afbildning af data for tid-sænkning i en boring.
 Fig. 3. Logarithmic plot of time-drawdown data.

kurve, eller rettere en skare af typekurver, for denne reservoirtype bringes i superposition på datakurvens tidligste data, idet den venstre halvdel af typekurven benyttes. Derefter foretages superposition på de senere data med typekurvens højre halvdel (se fig. 4).

Ved indsætning af værdierne for koordinaterne fra de valgte match-points i formlerne:

$$T = \frac{7,95 \times 10^{-2} Q}{s} W(u_{ay}, r/D), \text{ m}^2/\text{sek.}, \quad (12)$$

$$S = \frac{240 Tt}{r^2} l/u_{ay}, \quad (13)$$

hvor $W(u_{ay}) = \text{»boringsfunktionen«}$ for grundvandsreservoir med frit grundvandsspejl,

$l/u_a =$ abscissen for det første match-point på typekurven,

$l/u_y =$ abscissen for det andet match-point på typekurven,

$r/D =$ værdier for skarer af typekurver for den del af datakurven, som er påvirket af forsinket vandafgivelse.

Ved den første superposition bliver værdien af T for stor på grund af, at sænkningshastigheden er formindsket som følge af forsinket vandafgivelse fra sænkningstragten, og S vil ligge i en størrelsesorden som ved artesiske reservoirer.

Ved den anden superposition vil indflydelsen af den forsinkede afdræning

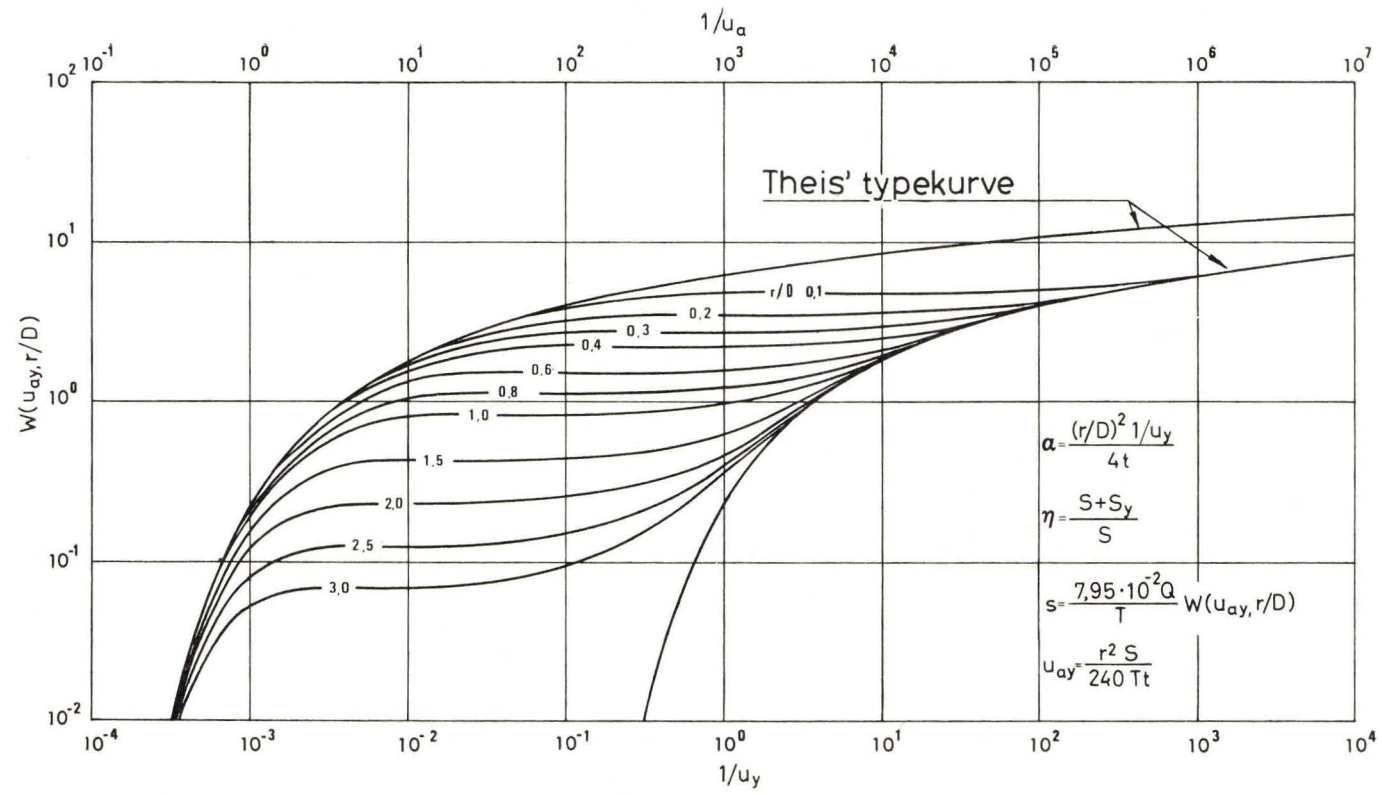


Fig. 4. Typekurve for et grundvandsreservoir med frit vandspejl. (Efter PRICKETT, 1965).

Fig. 4. Non steady-state water-table type curves. (After PRICKETT, 1965).

være ophørt, og værdierne for T og S vil være de korrekte værdier for reservoirs hydrauliske egenskaber.

Det er vigtigt, at den sidste superposition er foretaget på den del af datakurven, som er uden indflydelse af den forsinkede vandafgivelse. Det tidspunkt, efter hvilket dette er tilfældet, kan beregnes efter anvendelse af en speciel formel og kurve, som det dog vil føre for vidt at komme nærmere ind på her. Beregningen af dette tidspunkt foretages for at afgøre, om den benyttede del af datakurven falder efter dette tidspunkt. Er dette ikke tilfældet, må superpositionen gentages på et senere afsnit af datakurven.

Ved løbende at analysere pejledata under prøvepumpningen kan det således afgøres, hvor lang tid det er påkrævet at fortsætte pumpningen. Når pejledata for korrekt beregning af T og S foreligger, kan prøvepumpningen standses.

Det er også muligt at kontrollere sandsynligheden af værdien for specifik ydelse, S_y , ved i en formel for den såkaldt effektive magasinkoefficient at indsætte værdierne for S_y og S, beregnet på basis af begge match-points.

AFSTAND-SÆNKNING

Når flere observationsboringer i forskellig afstand af pumpeboringen foreligger, kan data for afsenkningen på samme tidspunkt plottes over afstanden fra pumpeboringen. Dette kan ske såvel på semilogaritmisk som på logaritmisk papir.

Semilogaritmisk afbildning

På semilogaritmisk papir plottes data for afstanden på den logaritmiske akse og sænkningen på den lineære akse. Igennem de fremkomne punkter trækkes en ret linie, hvis hældning bestemmes som sænkningen over en dekade. Denne indsættes i formlerne nedenfor, hvorefter T og S bestemmes:

$$T = \frac{0,366 Q}{\Delta s}, \text{ m}^2/\text{sek.}, \quad (14)$$

$$S = \frac{135 Tt}{r_e^2}, \quad (15)$$

hvor: r_e = radius i det påvirkede område, og de øvrige symboler er som tidligere angivet.

Ved plotning af værdier for afstand-sænkning bør vælges data fra sidste del af prøvepumpningen, hvor indflydelse fra forsinket afdræning er ophørt i de forskellige observationsboringer. De fundne værdier for transmissivitet og magasinkoefficient vil da være repræsentative for reservoiret inden for sænkningstragten.

Logaritmsk afbildning

Data for afstand-sænkning vil også kunne plottes på dobbelt logaritmsk papir, hvorved man får en datakurve. Ved superposition af Theis' typekurve over datakurven vælges et match-point, hvis koordinater aflæses på begge kurver (se fig. 5). Ved indsætning af de fundne værdier i formlerne:

$$T = \frac{7,95 \times 10^{-2} Q}{s} W(u) \text{ m}^2/\text{sek.}, \quad (16)$$

$$S = \frac{240 T t}{r^2} u, \quad (17)$$

hvor symbolerne er som tidligere angivet, kan koefficienterne T og S beregnes.

På grund af de ikke stationære strømningsforhold omkring boringen kan Theis' »ikke-ligevægt-formel« for bestemmelse af de hydrauliske egenskaber anvendes ved denne plotningsmetode.

Artesiske grundvandsreservoirer

Artesiske grundvandsreservoirer kan inddeles i to typer, egentlige artesiske grundvandsreservoirer og artesiske grundvandsreservoirer med lækage. Forskellen mellem disse to typer har stor praktisk betydning. Ved den førstnævnte type er det kun vandet i den fulde tykkelse af den mættede zone i det artesiske reservoir, som er tilgængeligt, mens der ved den sidstnævnte type under pumpningen sker en indsvivning af vand fra eller igennem de omgivende, svagt per-

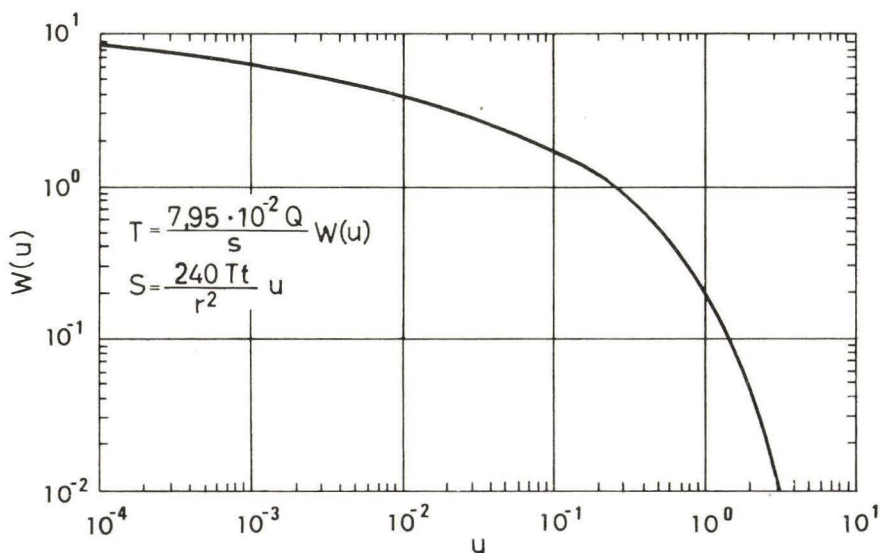


Fig. 5. Theis' »ikke-ligevægt-typekurve«, eller Theis' typekurve.

Fig. 5. Theis' nonequilibrium type curve.

meable lag. Denne indsvining forøger den tilgængelige vandmængde i reservoiret. Det er således muligt at skelne mellem to former for lækage, eller indsvining, nemlig indsvining gennem de omgivende, svagt permeable lag og indsvining fra magasinet i disse. Størrelsen af den vandmængde, reservoiret modtager ved denne indsvining, afhænger i overvejende grad af de omgivende lags hydrauliske egenskaber, hvilket i praksis vil sige disse lags vertikale permeabilitet. I visse tilfælde vil den indsvivende vandmængde svare til den oppumpede vandmængde, hvis denne holdes konstant.

Egentlige artesiske grundvandsreservoirer, d. v. s. tætte grundvandsreservoirer, forekommer yderst sjældent i naturen. I de fleste tilfælde vil der være tale om artesiske reservoirer med indsvining fra de omgivende lag.

Når sænkingsdata er korrigeret for eventuel barometereffekt eller partiel filterinterval, kan de plottes enten som data for tid-sænkning eller afstand-sænkning, dels på semilogaritmisk og dels på logaritmisk papir.

TID-SÆNKNING

Semilogaritmisk afbildning

Data for sænkningen plottes over tiden på semilogaritmisk papir, hvorefter T og S kan beregnes som ved reservoirer med frit grundvandsspejl ved indsættelse af Δs , som er sænkningen over en dekade, i formlerne (10) og (11)

$$T = \frac{0,183 Q}{\Delta s}, \text{ m}^2/\text{sek.},$$

$$S = \frac{135 T t_0}{r^2},$$

hvor de anvendte symboler er som tidligere angivet.

Af den semilogaritmiske plotning af data for tid-sænkning for artesiske reservoirer med lækage fremgår det, at sænkningshastigheden aftager med voksende tid. Følgelig vil værdier for T-koefficienten vokse med tiden. I de tilfælde, hvor oppumpningen er lig med den indsvivende vandmængde til reservoiret fra de omgivende lag, vil afsænkningen blive konstant, hvorfor Theis' »ikke-ligevægt-formel« ikke vil kunne anvendes. I sådanne tilfælde er det nødvendigt at benytte den nedenfor nævnte logaritmiske plotningsmetode for tid-sækningsdata for beregning af størrelserne T, S og den vertikale permeabilitet P' af de svagt permeable lag, som omgiver reservoiret.

Logaritmisk afbildning

Værdier for tid-sænkning plottes på dobbeltlogaritmisk papir for konstruktion af en datakurve. En skare typekurver for artesiske reservoirer med lækage

bringes i superposition over datakurven. Den første del af datakurven vil følge Theis' typekurve for $W(u)$ og u ($1/u$). Så snart indsvivningen af vand til det vandførende lag begynder at indvirke på afsænkningens hastighed, hvorved denne bliver mindre, vil datakurven afbøjes i forhold til Theis' typekurve og følge en af kurverne i skaren af typekurver for værdier af r/B for det lække, artesiske reservoir. Når et match-point er valgt, og værdier for koordinaterne $W(u, r/B)$, $1/u$, r/B , s og t er aflæst fra typekurver og datakurve (se fig. 6), indsættes de i de nedennævnte formler, hvorefter de hydrauliske egenskaber for det vandførende lag og den vertikale permeabilitet i de omgivende lag kan bestemmes:

$$T = \frac{7,95 \times 10^{-2} Q}{s} W(u, r/B), \text{ m}^2/\text{sek.}, \quad (18)$$

$$S = \frac{240 Tt}{r^2} 1/u, \quad (19)$$

$$P' = \frac{(r/B)^2 Tm'}{r^2}, \text{ m/sek.}, \quad (20)$$

hvor r/B = lækagefaktor,
 m' = mægtigheden af de omgivende, svagt permeable lag, i m,
 mens de øvrige symboler er som tidligere angivet.

AFSTAND-SÆNKNING

Analysen af afstand-sænkingsdata skal tjene som en supplerende metode til tid-sænkingsdataanalysen for bestemmelse af et grundvandsreservoirs hydrauliske egenskaber.

Afstand-sænkingsdata bør kun plottes på dobbeltlogaritmisk papir og derefter analyseres enten ved hjælp af typekurven for $K_0(r/B)$ versus r/B (Bessels funktion), (se fig. 7), eller ved hjælp af en skare typekurver for $W(u, r/B)$ versus r/B (Waltons typekurvemetode).

Den første af disse metoder anvendes for data for afstand-sænkning, hvor sænkningens hastighed ved slutningen af prøvepumpningsperioden er stærkt formindsket på grund af lækage fra de omgivende lag. Den anden metode anvendes, hvor sænkningens hastighed ved slutningen af prøvepumpningsperioden ikke viser synlige tegn på lækage fra de omliggende lag.

Datakurven er en logaritmisk plotning med sænkningen på ordinataksen og afstanden til de enkelte observationsboringer på abscisseaksen. Koordinaterne for et match-point aflæses ved superpositionsmetoden, som tidligere beskrevet. Disse værdier indsættes i formlerne (17), (18), (20) og (21) som vist nedenfor.

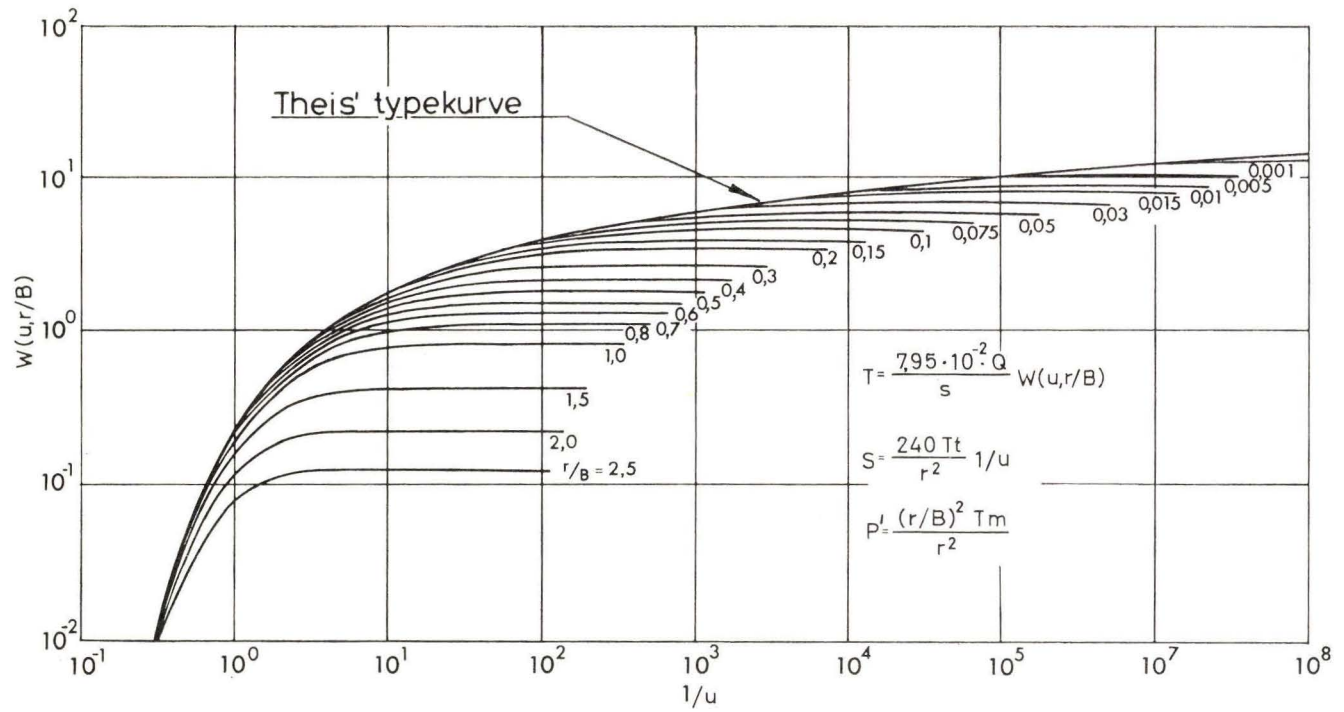


Fig. 6. Typekurve for artesisisk grundvandsreservoir med lækage. (Efter WALTON, 1962).
 Fig. 6. Type curves for unsteady radial flow to a well in a leaky aquifer. (After WALTON, 1962).

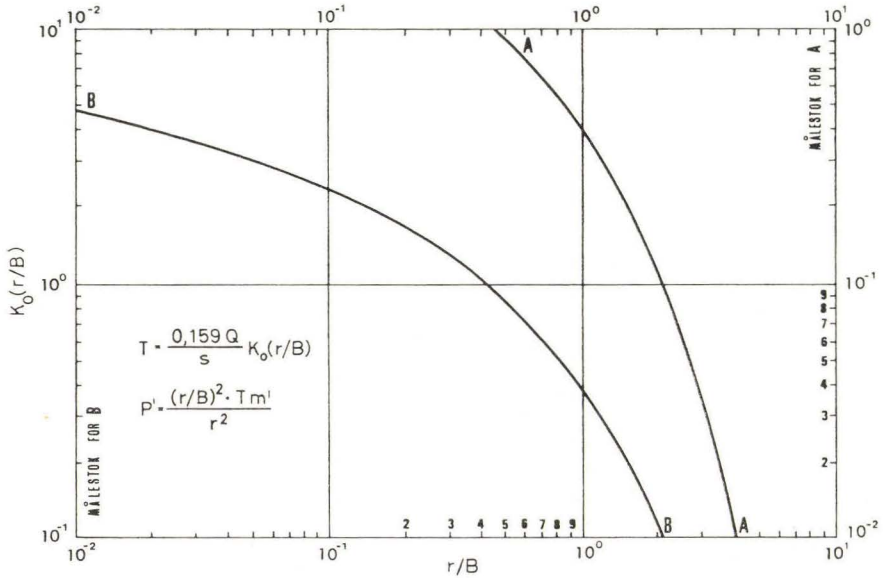


Fig. 7. Typekurve for stationær strømning i artesiske grundvandsreservoir med lækage.
(Efter JACOB, 1964).

Fig. 7. Steady-state leaky artesian type curve. (After JACOB, 1964).

Metode 1:

$$T = \frac{0,159 Q}{s} K_0(r/B), \text{ m}^2/\text{sek.}, \quad (21)$$

$$P' = \frac{(r/B)^2 T m'}{r^2}, \text{ m/sek.}$$

Metode 2:

$$T = \frac{7,95 \times 10^{-2} Q}{s} W(u, r/B), \text{ m}^2/\text{sek.},$$

$$S = \frac{240 T t}{r^2} u,$$

$$P' = \frac{(r/B)^2 T m'}{r^2}, \text{ m/sek.},$$

hvor: $K_0(r/B)$ = Bessels funktion,
og de øvrige symboler som tidligere angivet.

Hvis de hydrauliske parametre beregnet på de to metoder er i overensstemmelse med hinanden, vil de kunne benyttes ved beregningen af den fremtidige sænkning m.v. Er der derimod uoverensstemmelse i resultaterne fra de to metoder, må årsagen hertil undersøges nærmere.

De specielle forudsætninger, hvorunder disse to metoder kan benyttes er:

- 1) at grundvandsreservoiret er begrænset af over- og underliggende, svagt permeable lag,
- 2) at lækage finder sted gennem disse,
- 3) at denne er proportional med afsenkningen i det vandførende lag,
- 4) at den hydrauliske gradient i de over- og underliggende lag omgående ændres i overensstemmelse med sænkningen i det vandførende lag.

Den sidste forudsætning er vanskelig at få opfyldt under naturlige betingelser, og i mange tilfælde vil lækage fra de omgivende svagt, permeable lag udgøres dels af vand fra magasinet i disse og dels af vand, som passerer gennem disse.

HYDROLOGISKE GRÆNSER

Set ud fra et praktisk synspunkt er eksistensen af hydrologiske grænser af særdeles stor betydning, fordi en negativ hydrologisk grænse vil begrænse grundvandsreservoirets ydeevne, mens en positiv hydrologisk grænse vil forøge denne. Dette er i overensstemmelse med de tidligere forklarede virkninger af hydrologiske grænser. Der findes to måder til bestemmelse af beliggenheden af sådanne hydrologiske grænser, den ene er analytisk, og den anden er grafisk. Ved den analytiske metode er det kun muligt at bestemme afstanden til en grænse, hvorfor det uden kendskab til reservoirets geologiske opbygning vil være meget vanskeligt at lokalisere grænsen.

Ved den grafiske metode er det muligt at bestemme 2 mulige beliggenheder af en negativ hydrologisk grænse og derefter kontrollere lokaliseringen af grænsen ved hjælp af f.eks. geofysiske metoder. Hvis flere pumpeboringer kan benyttes, vil det imidlertid være muligt at bestemme den aktuelle beliggenhed af en hydrologisk grænse.

Ved en positiv hydrologisk grænse (vandløb, sø el. lign.) vil lokaliseringen ikke være noget problem, men her vil man være interesseret i at bestemme, i hvilket omfang den forsyner grundvandsreservoiret med vand.

Virkningen af en negativ hydrologisk grænse viser sig tydeligt på en semi-logaritmisk plotning af sænkningen over tiden med tiden på den logaritmiske akse ved, at sænkningshastigheden forøges brat. Eksistensen af flere negative grænser i forskellige afstande fra pumpeboringen vil resultere i flere på hinanden følgende bratte ændringer i sænkningshastigheden.

Effekten af en positiv hydrologisk grænse på sænkningen i en boring vil være den samme som lækage fra omgivende, svagt permeable lag, men den fysiske eksistens af grænsen i terrænet gør det let at skelne de to indvirkninger fra hinanden.

ANVENDELSEN AF DE HYDRAULISKE EGENSKABER

De hydrauliske egenskaber i et grundvandsreservoir kan benyttes ved bestemmelsen af den fremtidige afsenkning af grundvandsspejlet, eller trykniveauet, samt den gunstigste fordeling af oppumpningens størrelse fra de enkelte pumpeboringer. Når størrelsen af den totale oppumpning er fastlagt, kan følgende formler anvendes ved beregning af sænkningen:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u), \text{ i m}$$
$$u = \frac{r^2 S}{4 T t},$$

hvor symbolerne og måleenhederne er som tidligere angivet.

De variable i disse formler er afstanden (r) og tiden (t). Ved at indsætte forskellige værdier for disse variable er det muligt at bestemme afsenkningen i enhver afstand til ethvert tidspunkt. Dette skal ske for hver boring for den valgte kapacitet.

Den totale afsenkning i de enkelte pumpeboringer er sammensat dels af den selvproducerede afsenkning og dels af den sænkning, som er forårsaget af pumpningen på hver af de øvrige boringer i området.

Beregningen af den totale afsenkning i hver enkelt boring med samtidig pumpning på alle boringer sker ved hjælp af den såkaldte interferens-procedure, der kan illustreres ved formlen:

$$s_{\text{total}} = s_w + s_1 + s_2 + s_3 + \dots + s_n,$$

hvor

$$s_{\text{total}} = \text{den totale afsenkning i boringen, i m,}$$
$$s_w = \text{selvproduceret afsenkning i pumpeboringen i m,}$$
$$s_1 - s_n = \text{påvirkningen (interferensen) fra de øvrige pumpeboringer i m,}$$
$$n = \text{antallet af pumpeboringer.}$$

Med andre ord skal følgende beregninger gøres:

- 1) Beregn den selvproducerede afsenkning i hver boring ved den valgte kapacitet og tid.
- 2) Beregn påvirkningen af pumpningen fra hver boring i hver af de øvrige boringer.

3) Summen af alle sænkingskomponenterne for hver boring er lig med den totale afsenkning i boringen.

Ved denne fremgangsmåde kan kapaciteten ændres, indtil der er opnået det gunstigste forhold mellem den totalt oppumpede vandmængde og afsenkningen i alle boringer efter en given pumpeperiode.

Modsat kan påvirkningen fra en given oppumpning og en given fordeling af oppumpningen på de enkelte boringer beregnes i forskellig afstand af kildepladsen, hvorved det er muligt at kortlægge den rumlige fordeling af sænkingsdragten, eller det påvirkede område.

Det skal bemærkes, at der ved de foretagne beregninger af den fremtidige sænkning ikke er taget hensyn til nedsivningens indflydelse på grundvandsstanden.

Såfremt der forekommer nedsivning til grundvandsreservoiret i løbet af den periode, prognosen er opstillet for, vil den beregnede afsenkning være for stor. Da dette almindeligvis er tilfældet ved de fleste grundvandsforekomster, vil prognosen for afsenkning oftest være for pessimistisk. Forholdet mellem størrelsen af den oppumpede vandmængde og nedsivningens størrelse vil være bestemmende for tidspunktet for maksimal afsenkning.

Er infiltrationen større end eller lig med oppumpningen, vil tidspunktet for maksimal afsenkning ved fortsat, konstant oppumpning af den givne vandmængde i gennemsnit indtræffe efter en pumpeperiode lig med $\frac{1}{2}$ infiltrationscyklus. Da en infiltrationscyklus almindeligvis er 1 år, vil maksimal afsenkning indtræffe efter en pumpeperiode på ca. $\frac{1}{2}$ år. Forekommer der imidlertid længere perioder uden nedsivning, bør den maksimale afsenkning beregnes for den forventede længste tørkeperiode.

Selv om den oppumpede vandmængde er større end nedsivningen, vil den beregnede sænkning ikke blive overskredet af den aktuelle, såfremt den beregnes for hele indvindingsperioden.

Under visse omstændigheder er det imidlertid muligt at beregne størrelsen af den naturlige grundvandsafstrømning fra et givet opland. For at dette er muligt, er det nødvendigt at kende bredden af det vandførende lag (B), transmissiviteten (T) samt den oprindelige hydrauliske gradient (I). Ved indsættelse af disse værdier i Darcy's lov kan den totale grundvandsafstrømning beregnes efter formlen:

$$Q_t = I \times T \times B, \text{ m}^3/\text{sek.}, \quad (22)$$

hvor Q_t er den totale grundvandsafstrømning. Da den totale grundvandsafstrømning uden pumpning er lig med den vandmængde, der maksimalt vil kunne indvindes, og i praksis svarer til nedsivningen, er det således muligt at bestemme både nedsivning og den permanente ydelse for det pågældende grundvandsreservoir.

PRAKTISKE EKSEMPLER

MÅLEINSTRUMENTER

Ved de følgende eksempler er der benyttet data fra prøvepumpninger udført af DGU for Silkeborg kommunale vandværk og Vejle kommunale vandværk. Pumpeinstallationer, rørledninger for bortledning af pumpevand og vandmålere

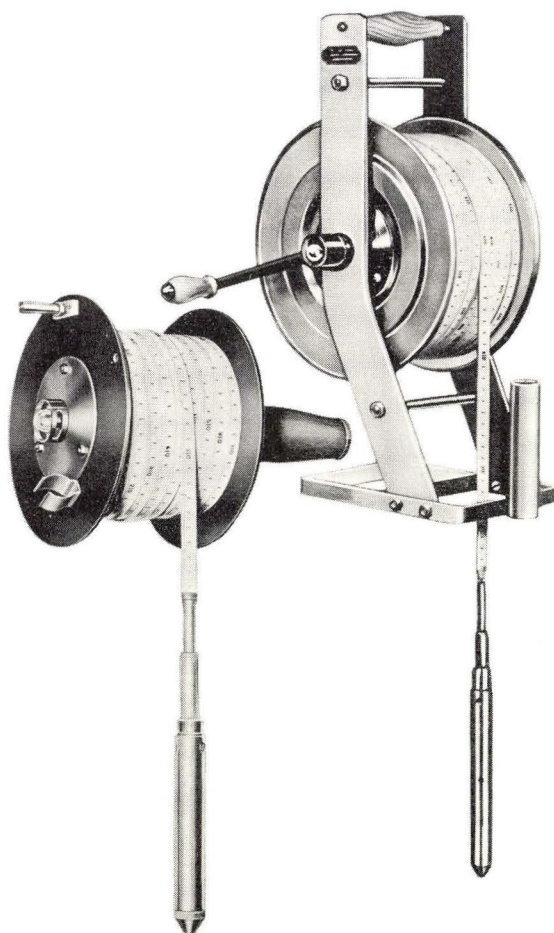


Fig. 8. Elektriske pejleinstrumenter.

Fig. 8. Instruments with electrical devices for measuring of water level.

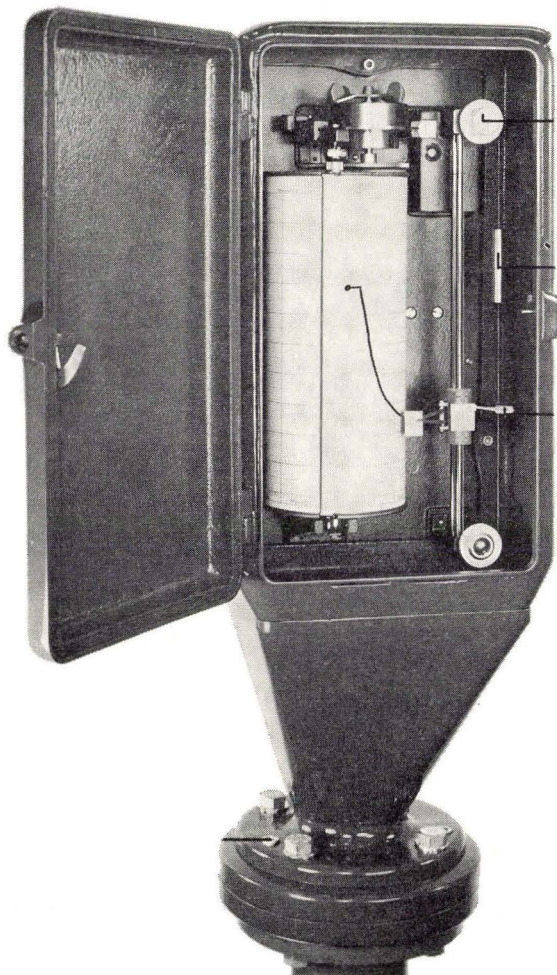


Fig. 9. Registrerende vandstandsmåler set forfra.
Fig. 9. Water level recorder. (Front).

for måling af kapaciteten er etableret af vandværkerne eller borefirmaet, der har udført boringerne.

Under prøvepumpningerne er den oppumpede vandmængde målt kontinuert med vandmåler og kontrolleret med målekar og stopur.

Pejling af vandspejlet er i alle pumpeboringer og i observationsboringer med en diameter mindre end 4" udført med elektriske pejleinstrumenter, hvis målekabel har haft cm-inddeling, og hvor målenøjagtigheden har været større end 0,5 cm (se fig. 8).

Pejling af vandstanden i observationsboringer med en diameter større end

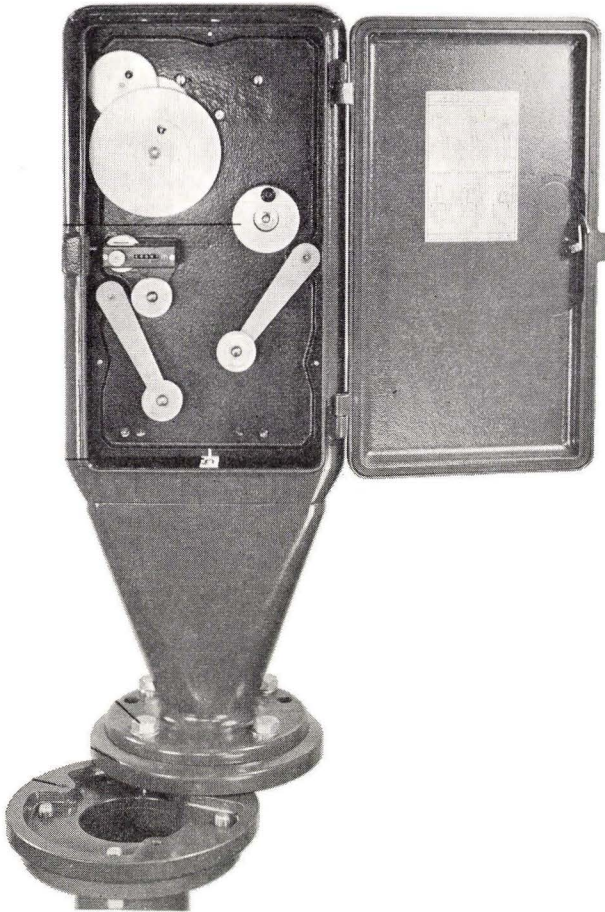


Fig. 10. Registrerende vandstandsmåler set bagfra.
Fig. 10. Water level recorder. (Back).

4'' er udført ved hjælp af registrerende vandstandsmålere af fabrikatet A. OTT (se fig. 9, 10 og 11).

Registrering af vandstanden kan med disse målere foretages i målestoksforholdene 1:1, 1:2, 1:5, 1:10 eller 1:20. Tidsskalaen kan vælges som daglig skala (1 time = 16 mm), ugentlig skala (1 time = 2 mm) eller månedlig skala (1 time = 0,5 mm). Den benyttede flyderdiameter har været 80 mm eller 110 mm, hvorved målenøjagtigheden bliver henholdsvis 3 mm og 1,5 mm vandstandsændring.

BORINGENS HYDRAULISKE EGENSKABER

Som eksempel på beregning af en borings hydrauliske egenskaber benyttes pumpe- og pejledata for en boring udført af Silkeborg kommune ved Hvinningdal.

HYDROGEOLOGISKE FORHOLD

De gennemborede jordlag i denne boring er:
DGU ark. nr. 87.554. (Situationsplan fig. 26).

Udført 11-17/3 1969 af V. STOFFREGEN, Silkeborg.

Terrænkote + 51,30 m

- 0– 0,4 m tørv
- 4,0 m sand, fint
- 11,0 m smeltevandssand og -grus
- 13,2 m moræneler
- 16,0 m smeltevandssand og -grus
- 16,5 m glimmerler (lokalmoræne)
- 28,0 m smeltevandssand og -grus
- 29,5 m glimmerler
- 35,0 m glimmerfinsand
- 39,0 m kvartssand, fint-mellemkornet
- 57,0 m kvartssand, mellemkornet-groft
- 57,2 m glimmerler

Vandrejsning: 5,8 m under terræn.

Vandmængde: 100 m³/h ved 4,65 m sænkning (51 timers pumping).

Borediameter 12". Forerør: 8" PVC rør.

Filter: 8" PVC fra 41,0–57,0 m under terræn.

Kornstørrelse i 39–57 m: 0,5 mm < D₆₀ < 0,8 mm.

Slidsbredde i filter: 1 mm. Gruskastning: 2–3 mm.

Det fremgår af boreprofilen samt af andre boringer i området, at grundvandsreservoiret er artesisk. Prøvepumpningsanalyserne har endvidere vist, at det tillige er et artesisk reservoir med lækage.

Metoden for bestemmelse af en borings hydrauliske egenskaber er anvendelig for alle reservoirtyper.

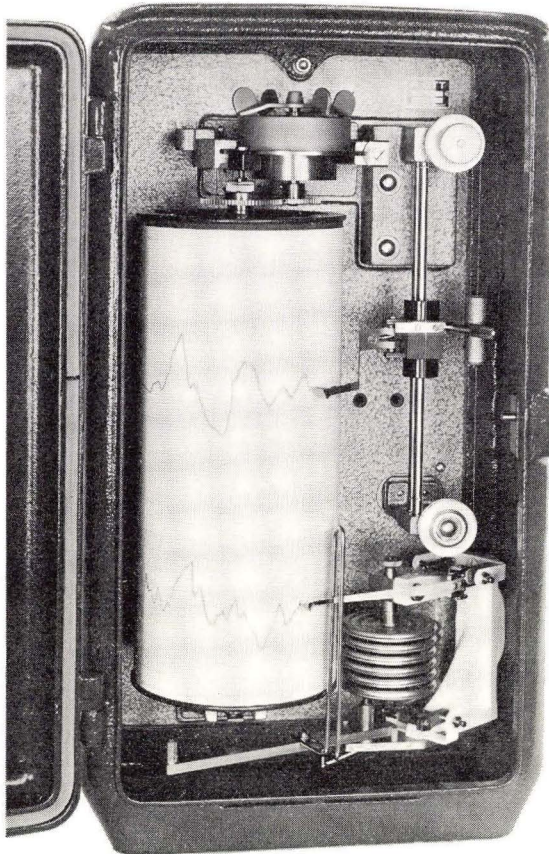


Fig. 11. Registrerende vandstandsmåler med barograf set forfra.
 Fig. 11. Water level recorder with barograph. (Front).

PRØVEPUMPNINGSDATA OG BEREGNINGER

I tabel 1 er vist pumpe- og pejledata fra en prøvepumpning med trinvis varieret kapacitet på ovennævnte boring.

Værdier for sænkningen som funktion af tiden er plottet på semilogaritmisk papir, som vist fig. 12. Gennem de afbildede punkter for hver kapacitet er trukket rette linier, og Δs_w (forøgelsen af sænkningen efter 1 times pumpning med hver kapacitet) er bestemt.

Værdierne af Δs_w fra fig. 12 er givet i tabel 2. Den totale sænkning (s_w) efter 1 times pumpning med hver kapacitet er beregnet. Ud fra den totale sænkning (s_w), og den totale kapacitet (Q) er værdier for den specifikke sænkning (s_w/Q) beregnet og ligeledes vist i tabel 2.

Boringens hydrauliske egenskaber er bestemt ved Jacob's metode og Rora-baugh's metode.

Tabel 2. Målte og beregnede sænkninger i pumpeboring DGU ark. nr. 87.554, Hvinningdal, Silkeborg kommune.
 Table 2. Measured and calculated drawdown in pumping well DGU File No. 87.554, Hvinningdal area, Silkeborg Water Supply.

TRIN	Δs_w i m	s_w i m	$Q \times 10^{-3}$ m ³ /sek.	s_w/Q sek/m ²	JACOB'S METODE		RORABAUGH'S METODE			
					B = 134,4 BQ i m	C = 670 CQ ² i m	s_w i m	B = 139,5 BQ i m	C = 11250 CQ ^{2,87} i m	s_w i m
1	0,795	0,795	5,91	134,6	0,78	0,02	0,80	0,825	0,004	0,83
2	0,775	1,570	11,05	142,1	1,48	0,08	1,56	1,54	0,03	1,57
3	0,94	2,510	17,30	145,2	2,32	0,20	2,52	2,42	0,10	2,52
4	0,93	3,440	23,20	148,3	3,11	0,36	3,47	3,24	0,22	3,46
5	0,85	4,290	27,90	153,7	3,74	0,52	4,26	3,89	0,40	4,29

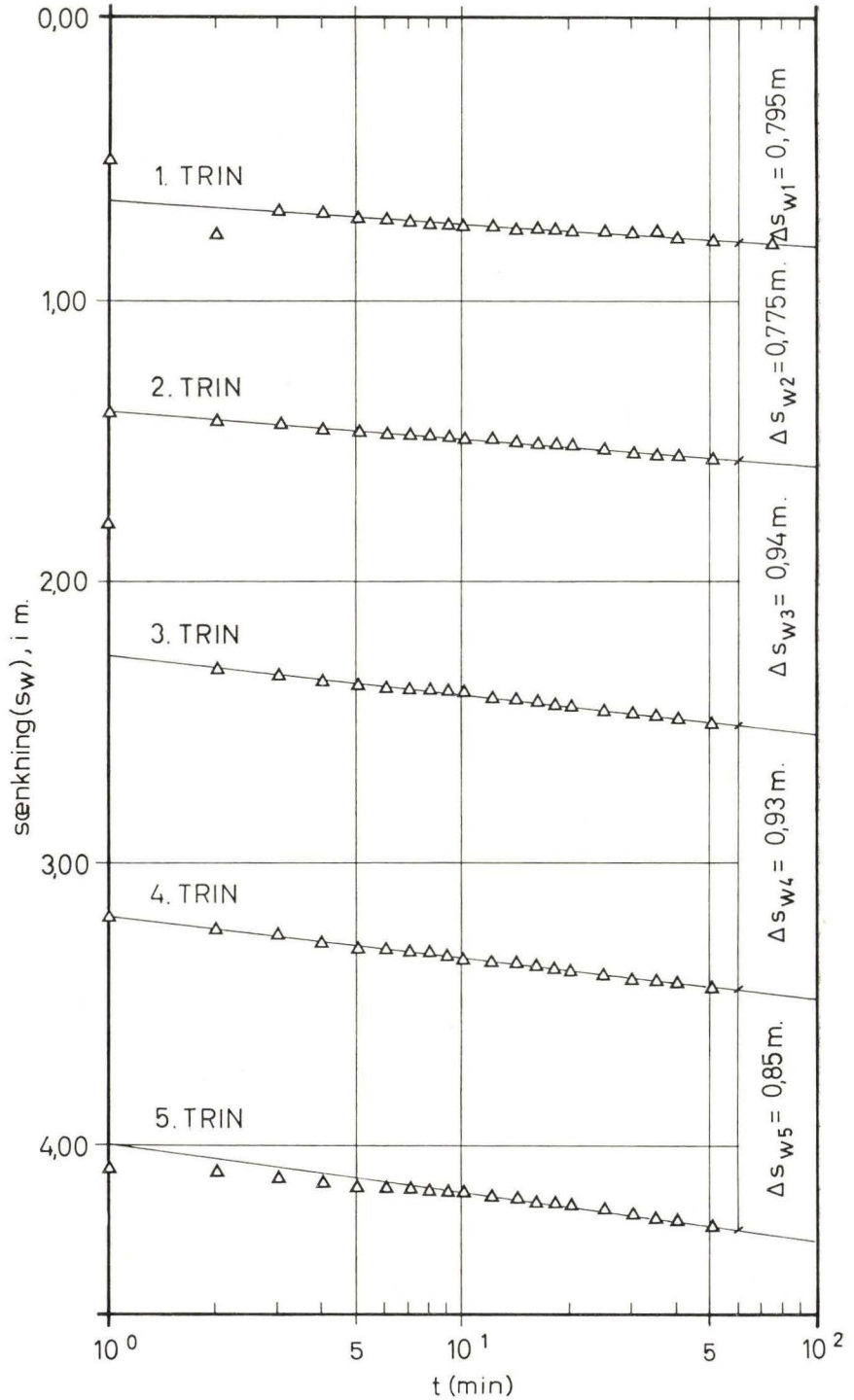


Fig. 12. Semilogaritmisk afbildning af data for tid - sænkning fra prøvepumpning med trinvis varieret kapacitet på boring DGU ark nr. 87.554, Hvinningdal, Silkeborg kommune.

Fig. 12. Semilogarithmic plot of time-drawdown data during step-drawdown pumping test on well DGU File No. 87.554 Hvinningdal area, Silkeborg Water Supply.

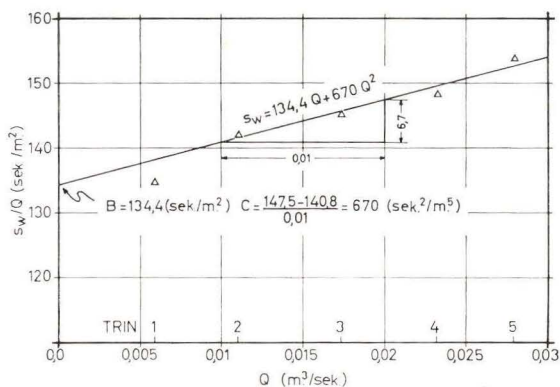


Fig. 13. Grafisk bestemmelse af pumpeborings hydrauliske egenskaber ved Jacob's metode.

Fig. 13. Graphical determination of the hydraulic properties of the pumping well by Jacob's method.

JACOB'S METODE

Værdier for s_w/Q er afbildet over værdier for Q på lineært papir som vist fig. 13.

Skæringspunktet mellem en ret linie gennem de afbildede punkter og ordinat-aksen giver værdien for formationstabsfaktoren ($B = 134,4$ sek./m²). Værdien for filtertabsfaktoren ($C = 670$ sek.²/m⁵) er lig med tangens til vinklen mellem den rette linie gennem punkterne og absicseaksen. Beregningerne og den benyttede ligning for beregning af s_w er vist fig. 13.

RORABAUGH'S METODE

Betingelsen for anvendelsen af denne metode er, at det er muligt at trække en ret linie gennem punkter for værdier af $(s_w/Q - B)$ og tilsvarende værdier for Q plottet på dobbeltlogaritmisk papir.

Værdierne for s_w/Q i tabel 2 benyttes ved beregning af værdierne for B og C på følgende måde.

For at finde den værdi af udtrykket $(s_w/Q - B)$, for hvilket den ovennævnte betingelse er opfyldt, er det nødvendigt at indsætte forskellige værdier for B . Erfaringerne har vist, at værdien af B almindeligvis vil være beliggende inden for det interval, hvori værdierne af (s_w/Q) fra de første 3 trin er beliggende.

I det viste eksempel (fig. 14) tilfredsstiller værdien $B = 139,5$ sek./m² denne betingelse.

For at finde n (eksponenten til den turbulente strømning) ad grafisk vej er det nødvendigt at konstruere en vilkårlig retvinklet trekant, der har den rette linie som hypotenusen, og hvis kateter er parallelle med koordinataksene. Fra denne trekant kan størrelsen $(n - 1)$ beregnes som tangens til vinklen mellem hypotenusen og kateten parallel med absicseaksen under forudsætning af, at

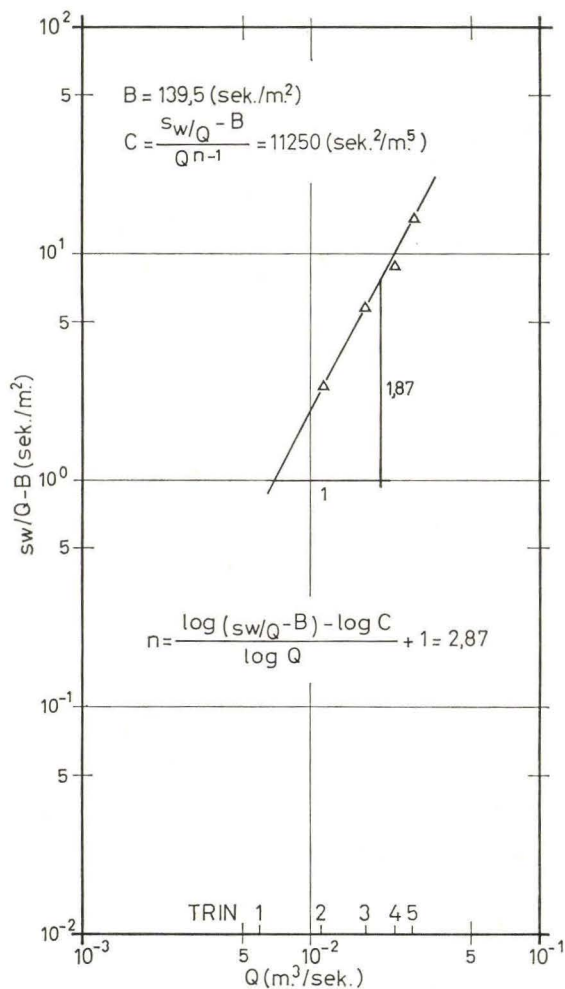


Fig. 14. Grafisk bestemmelse af pumpeborings hydrauliske egenskaber ved Rorabaugh's metode.

Fig. 14. Graphical determination of the hydraulic properties of the pumping well by Rorabaugh's method.

længden af kateterne måles lineært. Derfor vil $n = \text{tg}\alpha + 1$. Den grafiske løsning er vist fig. 14, hvor $\text{tg}\alpha = 1,87$ og $n = 1,87 + 1 = 2,87$.

Det er imidlertid også muligt at beregne n ved hjælp af følgende formel:

$$n = \frac{\log(s_w/Q - B) - \log C}{\log Q} + 1 \quad (23)$$

Eksempel:

$$\begin{aligned}
 s_w/Q - B &= 10^0 \text{ sek./m}^2 \\
 Q &= 0,0068 \text{ m}^3\text{/sek.} \\
 C &= 11.250 \text{ sek.}^2\text{/m}^5.
 \end{aligned}$$

Ved indsættelse af disse værdier i formel (23) fås:

$$n = \frac{\log 10^0 - \log 11.250}{\log 0,0068} + 1 = 2,87$$

Når n er fundet, kan størrelsen af filtertabsfaktoren (C) beregnes ved formlen:

$$C = \frac{s_w/Q - B}{Q^{n-1}}, \text{ sek.}^2/\text{m}^5 \quad (24)$$

Eksempel:

$$n = 2,87, s_w/Q - B = 10^0 \text{ sek./m}^2 \text{ og} \\ Q = 0,0068 \text{ m}^3/\text{sek.}$$

Indsættes disse værdier i formel (24) fås:

$$C = \frac{1}{0,0068^{1,87}} = 11250 \text{ sek.}^2/\text{m}^5$$

GRUNDEVANDSRESERVOIRETS HYDRAULISKE EGENSKABER

RESERVOIR MED FRIT VANDSPEJL

Bestemmelse af de hydrauliske egenskaber for et grundvandsreservoir med frit vandspejl vil blive illustreret ved hjælp af eksempler baseret på såvel sænkingsdata under en prøvepumpning som stigningen af vandspejlet efter stop af pumpning.

Sænkingsdata

Som eksempel er benyttet sænkingsdata fra en prøvepumpning på en boring for Vejle kommune, vandværket i Nørremarken. Der er prøvepumpet på boring DGU ark. nr. 116.658 (L-V) og med kontinuerlig registrering af vandspejlet med vandstandsmåler i observationsboring DGU ark. nr. 116.684 (P-29), som er beliggende 30 m fra pumpeboringen. Der er endvidere udført håndpejling af vandspejlet i 4 omliggende boringer (situationsplan fig. 15). Pejledata fra disse er dog ikke medtaget her.

HYDROGEOLOGISKE FORHOLD

De geologiske forhold i området er ret ensartede og kan illustreres ved følgende boreprofil.

DGU. ark. nr. 116.658

Udført april/maj 1969 af IVERSEN & SØNNER, Vejle.

Terrænkote ca. + 85,6 m

0 – 33,0 m moræneler

– 66,0 m smeltevandssand

– 74,5 m kvartssand

fra 74,5 m glimmerfinsand

Vandrejsning ca. 45 m under terræn.

Vandmængde 94 m³/h ved 2,37 m sænkning (18 døgn pumpning).

Borediameter: 12" fra 0 – 74,5 m.

Førerør, stål: 250 mm fra 0 – 62,5 m.

Filter: 150 mm, kobber, fra 62,5 – 74,5 m.

Kornstørrelse i laget: 62,5 – 74,5 m: 0,5 mm < D₆₀ < 0,85 mm.

Slidsbredde i filter: 1,25 mm.

Gruskastning: 0,8 – 1,2 mm ydre gruskastning
2 – 3 mm indre gruskastning.

Observationsboringen DGU ark. nr. 116.684 er udført i juli/august 1969 som 8" boring med PVC forerør fra 0 – 45 m og med filter fra 45 – 74 m under terræn. Terrænkoten er + 85,25 m, vandrejsningen ca. 45 m under terræn.

KORREKTION FOR BAROMETEREFFEKT

Som det fremgår af boreprofilen, har det vandførende lag frit grundvandsspejl. Grundvandsspejlet i et sådant reservoir er almindeligvis ikke påvirket af ændringer i lufttrykket. Dette er imidlertid ikke tilfældet her, hvor barometereffekten er bestemt til 100% i alle borer i området. Barometereffekten skyldes imidlertid det dækkende lag af moræner.

Som eksempel på barometereffektens indvirkning på vandstanden kan henvises til tabel 3, hvoraf det fremgår, at en lufttrykændring den 24/10 1969 på –12,7 mm kviksølv har formindsket sænkningen med 17,3 cm. Den målte sænkning er 36,4 cm, mens den virkelige sænkning er 53,7 cm, der er angivet som den korrigerede værdi for afsænkningen. Da indflydelsen af lufttrykændringen her har været på ca. 50% af den målte sænkning, er det indlysende, at en korrektion for barometereffekten er en absolut forudsætning for, at de registrerede værdier for sænkning kan benyttes til beregning af det vandførende lags hydrauliske egenskaber.

Ud fra den kendte barometereffekt (BE) på 100% og formel (5) er alle målte sænkninger korrigeret for indvirkning af lufttrykændringer, som vist i tabel 3, hvor der tillige er angivet værdier for de målte afsænkninger og lufttrykændringer.

Eksempel:

$$\begin{aligned} BE &= 100\% \\ \Delta P &= -12,7 \text{ mm kviksølv (24.10.69 kl. 12.00)} \\ \Delta W &= \frac{100 \times 12,7 \times 1,36}{100} = 17,3 \text{ cm V.S.} \end{aligned}$$

Da lufttrykændringen (ΔP) skyldes et fald i lufttrykket, hvilket er angivet ved et minus foran værdien, vil vandstanden ligge for højt, og den målte afsenkning vil derfor være for lille. Korrektionen (17,3 cm) skal derfor lægges til den målte sænkning (36,4 cm) for at få den korrekte værdi for sænkningen (53,7 cm).

Lufttrykket ved start af prøvepumpningen benyttes som referenceniveau, og i tabel 3 er stigning i lufttrykket angivet ved »+« foran værdien, og fald i lufttrykket er angivet ved »-« foran værdien.

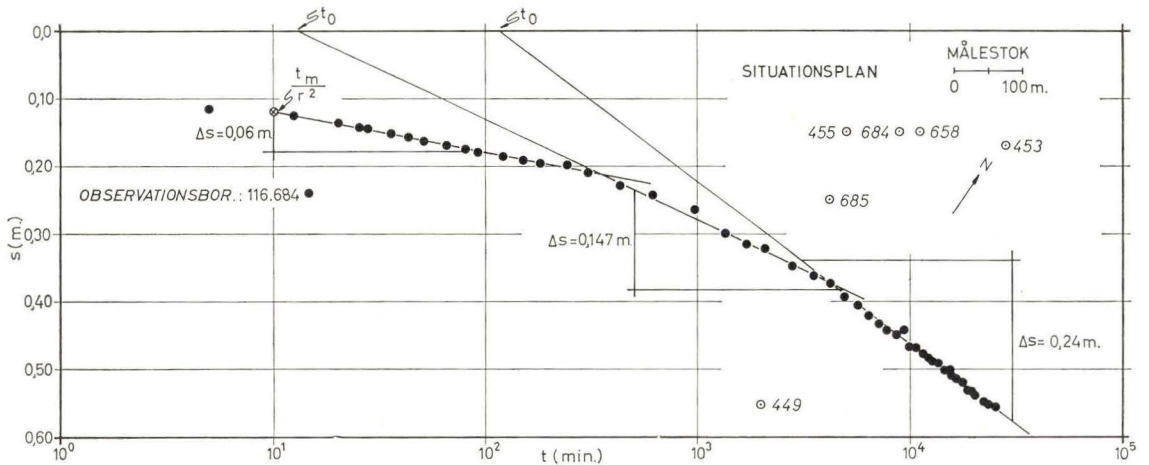


Fig. 15. Semilogaritmisk afbildning af tid – sænkning i observationsboring DGU ark. nr. 116.684 under prøvepumpning på boring DGU ark nr. 116.658 i perioden 10–28/10 1969, Nørremarken, Vejle Vandværk, med situationsplan over boringernes beliggenhed.

Fig. 15. Semilogarithmic plot of time-drawdown data for observation well DGU File No. 116.684 during pumping test on well DGU File No. 116.658 for the period October 10th–28th 1969, Nørremarken area, Vejle Water Supply, with a situation map.

TID-SÆNKNING

Semilogaritmisk afbildning

De korrigerede værdier for sænkningen i observationsboringen (se tabel 3) er plottet på semilogaritmisk papir, som vist fig. 15. På figuren er trukket 3 rette linier gennem de afbildede punkter, og sænkningen over 1 dekade er beregnet for hver af disse, som vist på figuren. Disse værdier benyttes ved beregning af transmissiviteten (T) i det vandførende lag ved indsættelse i formel (10).

Eksempel:

$$\begin{aligned}\Delta s &= 0,24 \text{ m} \\ Q &= 2,54 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{sek. eller } 91,5 \text{ m}^3/\text{h} \\ T &= \frac{0,183 \times 2,54 \times 10^{-2}}{0,24} = 1,94 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{sek.}\end{aligned}$$

For at beregne magasinkoefficienten (S), skal værdien for t_0 findes, som vist fig. 15.

Eksempel:

$$\begin{aligned}r &= 30 \text{ m,} \\ T &= 1,94 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{sek.} \\ t_0 &= 110 \text{ min.}\end{aligned}$$

Tabel 3. Data for tid – sænkning, lufttrykændringer og korrigeret sænkning i observationsboring DGU ark. nr. 116.684, under prøvepumpning på boring DGU ark. nr. 116.658, Nørremarken, Vejle vandværk, den 10–28/10 1969.

Table 3. Time-drawdown data, changes in atmospheric pressure and corrected drawdown for observation well DGU File No. 116.684 during pumping test on well DGU File No. 116.658 for the period October 10th–28th 1969, Nørremarken area, Vejle Water Supply.

Dato okt. 1969	Kl.	Tid (t) min.	ΔP mm Hg.	Sækn. (s) cm	ΔW for BE = 100% cm	Sækn. korr. (s) cm
10.	1400	0	0,0	0,0	0,0	0,0
		5		11,5		
		12,5		12,5		
		25		13,8		
		27,5		14,0		
		35	– 0,2	14,8	+ 0,2	15,0
		42,5		15,2		15,4
		50	– 0,3	15,6	+ 0,5	16,1
		65		16,2		16,8
		80	– 0,4	16,8	+ 0,6	17,4
		90	– 0,4	17,0	+ 0,6	17,6
	1600	120	– 0,6	17,5	+ 0,9	18,4
		150	– 0,7	17,8	+ 1,1	18,9
	1700	180	– 0,9	18,0	+ 1,3	19,3
	1800	240	– 1,0	18,3	+ 1,4	19,7
	1900	300	– 1,0	19,5	+ 1,4	20,9
	2100	420	– 1,3	20,8	+ 1,8	22,6
	2400	600	– 1,9	21,5	+ 2,7	24,2
11.	0600	960	– 1,5	24,5	+ 2,1	26,6
	1200	1320	– 1,5	27,8	+ 2,1	29,9
	1800	1680	– 1,6	29,0	+ 2,3	31,3
	2400	2040	– 1,2	30,2	+ 1,7	31,9
12.	1200	2760	– 2,9	31,1	+ 3,7	34,8
	2400	3480	– 4,9	29,3	+ 6,7	36,0
13.	1200	4200	– 8,0	26,8	+10,9	37,7
	2400	4920	– 9,7	26,0	+13,2	39,2
14.	1200	5640	–10,3	26,5	+14,0	40,5
	2400	6360	– 8,7	30,4	+11,8	42,2
15.	1200	7080	– 4,5	36,8	+ 6,2	43,0
	2400	7800	– 1,6	41,8	+ 2,2	44,0
16.	1200	8520	– 0,3	44,2	+ 0,5	44,7
	2400	9240	+ 0,3	44,5	– 0,5	44,0
17.	1200	9960	0,0	46,5	0,0	46,5
	2400	10680	– 0,8	45,5	+ 1,2	46,7
18.	1200	11400	– 2,2	44,5	+ 3,1	47,6
	2400	12120	– 4,5	42,0	+ 6,2	48,2
19.	1200	12840	– 6,4	40,0	+ 8,7	48,7
	2400	13560	– 7,2	39,0	+ 9,8	48,8
20.	1200	14280	– 8,8	38,0	+12,0	50,0
	2400	15000	– 7,9	39,5	+10,8	50,3
21.	1200	15720	– 4,9	44,0	+ 6,7	50,7
	2400	16440	– 3,3	46,5	+ 4,6	51,1
22.	1200	17160	– 2,6	48,2	+ 3,6	51,8
	2400	17880	– 2,1	49,1	+ 3,0	52,1
23.	1200	18600	– 4,0	47,5	+ 5,5	53,0
	2400	19320	– 7,2	43,2	+ 9,8	53,0
24.	1200	20040	–12,7	36,4	+17,3	53,7
	2400	20760	–10,5	39,4	+14,3	53,7
25.	2400	22200	– 8,0	44,2	+10,5	54,7
26.	2400	23640	+ 1,0	56,4	– 1,4	55,0
27.	2400	25080	+ 0,5	55,9	– 0,7	55,2

Indsættes disse værdier i formel (11) fås:

$$S = \frac{135 \times 1,94 \times 10^{-2} \times 110}{900} = 3,2 \times 10^{-1}$$

eller specifik ydelse = 32%.

Denne metode kaldes ekstrapolationsmetoden, hvor t_0 findes som skæringspunkt for $s = 0$, som vist fig. 15. I visse tilfælde vil dette skæringspunkt falde uden for diagrammet. I så fald benyttes en metode uden ekstrapolation og ved hjælp af følgende formel:

$$S = \frac{135 \times T \times t_m / r^2}{\log_{10}^{-1}(s/\Delta s)}, \quad (25)$$

hvor: t_m = tiden for et vilkårligt valgt punkt på den rette linie gennem de benyttede punkter.

Eksempel: Fra fig. 15 fås:

$$\text{for } t_m = 10 \text{ min.}, s = 0,12 \text{ m}, \Delta s = 0,06 \text{ m.}$$

Fra formel (10) bestemmes:

$$T = 7,75 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{sek.}, r = 30 \text{ m.}$$

Ved indsættelse af disse værdier i formel (25) fås:

$$S = \frac{135 \times 7,75 \times 10^{-2} \times 10/30^2}{\log_{10}^{-1}\left(\frac{0,12}{0,06}\right)} = 1,15 \times 10^{-3}$$

Tabel 4. Beregnede værdier for transmissivitet (T) og magasinkoefficient (S) på basis af prøvepumpning på boring DGU ark. nr. 116.658, Nørremarken, Vejle vandværk.

Table 4. Calculated values of coefficients of transmissivity (T) and storage (S) from pumping test on well DGU File No. 116.658, Nørremarken, area, Vejle Water Supply.

	Tid-sænkning		Afstand-sænkning				
	Semilogaritmsk afbildning	Logaritmsk afbildning	Semilogaritmsk afbildning			Logaritmsk afbildning	
Observationsboring DGU ark. nr. på atlasblad 116.	684	684	449	453	455	684	685
Vejle vandværk nr.	P-29	P-29	P-24	P-26	P-28	P-29	L-II
$T \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{sek.}$	7,75 3,16 1,94	2,02	2,24			2,1	
$S \times 10^{-1}$	0,0115 0,615 3,2	2,16	1,85			1,7	

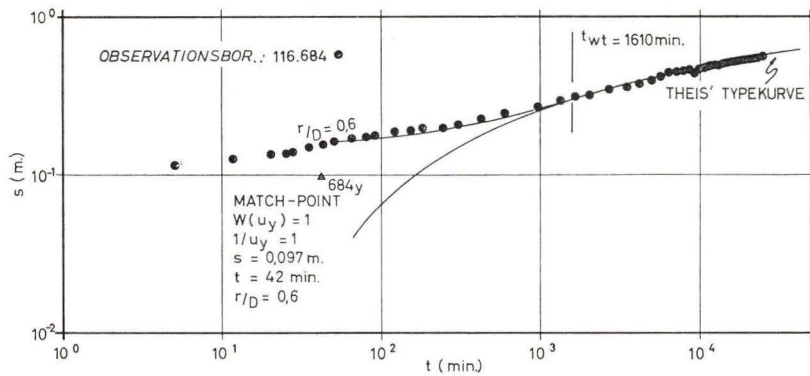


Fig. 16. Dobbelt logaritmsk afbildning af data for tid-sænkning i observationsboring DGU ark. nr. 116.684 under prøvepumpning på boring DGU ark. nr. 116.658 i perioden 10–28/10 1969, Nørremarken, Vejle Vandværk.

Fig. 16. Logarithmic plot of time-drawdown data for observation well DGU File No. 116.684 during pumping test on well DGU File No 116.658 for the period October 10th–28th 1969, Nørremarken, Vejle Water Supply.

Alle de beregnede værdier af T og S fra den semilogaritmske plotning af tid-sænkingsdata er vist i tabel 4.

Ændringen i størrelsen af T og S under pumpeperioden skyldes virkningen af den forsinkede vandafgivelse. Kun den sidste værdi repræsenterer det vandførende lags virkelige hydrauliske egenskaber, og kun denne vil kunne benyttes ved prognoser for den fremtidige afsænkning.

Logaritmsk afbildning

Tid-sænkingsdata kan også plottes på dobbelt logaritmsk papir, som vist fig. 16, med henblik på beregning af T og S .

Det skal bemærkes, at første superposition, som omtalt ovenfor (se side 31) med den venstre halvdel af typekurven fig. 4 ikke har været mulig, fordi der ikke foreligger data fra pumpeperiodens første minutter.

Ved anden superposition med højre halvdel af typekurven fig. 4, som vist på fig. 16, er match-point valgt, og dets koordinater aflæst på typekurve og datakurve.

Ved indsættelse af disse værdier i formlerne (12) og (13) kan T og S beregnes.

Typekurvekoordinater:

$$\begin{aligned} W(u_y) &= 1 \\ 1/u_y &= 1 \\ r/D &= 0,6 \end{aligned}$$

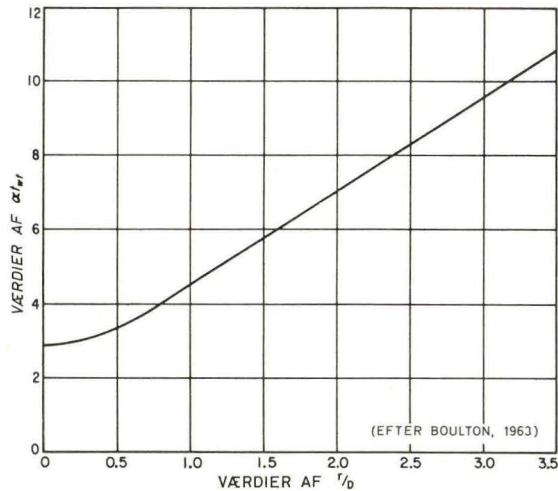


Fig. 17. Typekurve til bestemmelse af tidspunktet, efter hvilket den forsinkede vandafgivelse fra det vandførende lag er uden indflydelse på sænkningen.

Fig. 17. Curve for estimating the time at which the effect of delayed gravity drainage cease to influence drawdown.

Datakurvekoordinater:

$$s = 0,097 \text{ m, } t = 42 \text{ min.}$$

og for:

$$Q = 2,54 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{sek.} \quad 91,5 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$r = 30 \text{ m}$$

fås:

$$T = \frac{7,95 \times 10^{-2} \times 2,54 \times 10^{-2} \times 1}{0,097} = 2,02 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{sek.}$$

$$S_y = \frac{240 \times 2,02 \times 10^{-2} \times 42 \times 1}{900} = 2,16 \times 10^{-1}$$

$$\text{eller specifik ydelse} = 21,6\%$$

Som omtalt under den teoretiske gennemgang (se side 33) må superpositionen af typekurven foretages på den sidste del af datakurven, hvor indflydelsen fra den forsinkede vandafgivelse er ophørt. Tidspunktet (t_{wt}), efter hvilket denne betingelse er opfyldt, kan beregnes ved hjælp af kurven fig. 17 og følgende formler:

$$\alpha = \frac{(r/D)^2 \times 1/u_y}{4 t}, \text{ min.} \quad (26)$$

$$t_{wt} = \frac{\alpha t_{wt}}{\alpha}, \text{ min.} \quad (27)$$

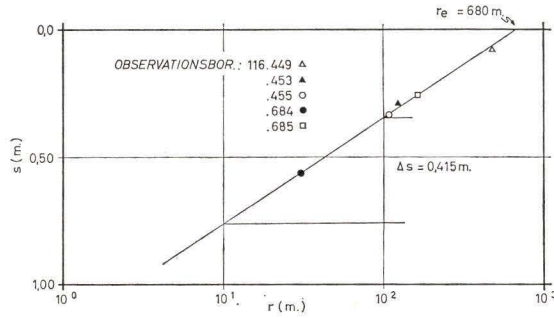


Fig. 18. Semilogaritmsk afbildning af data for afstand – sænkning for observationsboringer ved prøvpumpning på boring DGU ark. nr. 116.658, Nørremarken, Vejle Vandværk.
 Fig. 18. Semilogarithmic plot of distance-drawdown data for observation wells from pumping test on well DGU File No. 116.658, Nørremarken area, Vejle Water Supply.

hvor: α = indeks for forsinket vandafgivelse, i min.
 t_{wt} = forsinket tid, i min.

Eksempel:

Fra match-point fig. 16 fås:

$$\begin{aligned} r/D &= 0,6 \\ l/u_y &= 1 \\ t &= 42 \text{ min.} \end{aligned}$$

Indsat i formel (26) fås:

$$\alpha = \frac{(0,6)^2 \times 1}{4 \times 42} = 2,14 \times 10^{-3} \text{ min.}$$

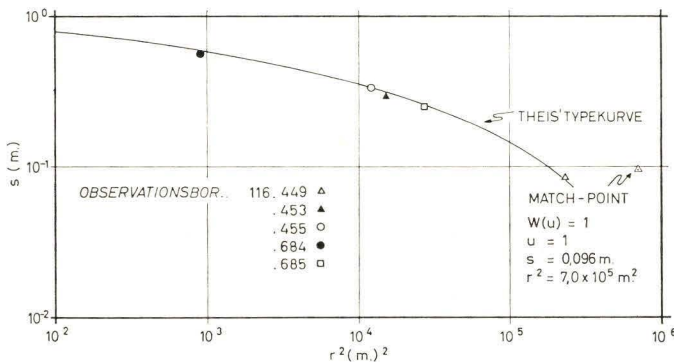


Fig. 19. Dobbeltlogaritmsk afbildning af data for afstand – sænkning ved prøvpumpning på boring DGU ark. nr. 116.658, Nørremarken, Vejle Vandværk.
 Fig. 19. Logarithmic plot of distance-drawdown data for observation wells from pumping test on well DGU File No. 116.658, Nørremarken area, Vejle Water Supply.

Tabel 5. Sænkning i og afstand til omliggende observationsboringer ved prøvepumpning på boring DGU ark. nr. 116.658, Nørremarken, Vejle vandværk, den 10–28/10 1969
 Table 5. Distance-drawdown data for observation wells from pumping test on well DGU File No. 116.658, Nørremarken area, Vejle Water Supply.

Observationsboring DGU ark. nr. på atlasblad 116	449	453	455	684	685
Vejle vandværk nr.	P-24	P-26	P-28	P-29	L-II
Afstand til pumpeboring L-V, DGU ark. nr. 116.658, m	470,80	122,60	109,62	30,00	164,04
Sænkning, m	0,08	0,29	0,335	0,56	0,255

Ved hjælp af kurven fig. 17 og $r/D = 0,6$ findes $\alpha t_{wt} = 3,45$.
 Indsættes værdier for α og αt_{wt} i formel (27) fås:

$$t_{wt} = \frac{3,45}{2,14 \times 10^{-3}} = 1.610 \text{ min.}$$

Som det fremgår af fig. 16, er superpositionen foretaget på data beliggende efter $t = 1610$ min., hvorfor de fundne værdier af T og S er repræsentative for det vandførende lag. De fundne værdier af T og S ved denne metode er ligeledes vist i tabel 4.

AFSTAND-SÆNKNING

Under en prøvepumpning med observationer af vandspejlet i flere boringer i forskellig afstand fra pumpeboringen er det muligt at kontrollere værdier af T og S beregnet på basis af data for tid-sænkning med data for sænkningen til samme tidspunkt, men i forskellig afstand (afstand-sænkning).

Værdier for afstanden til, og sænkningen ved slutningen af ovennævnte prøvepumpning i 4 omliggende boringer er vist i tabel 5 og afbildet på semilogaritmisk og dobbeltlogaritmisk papir, som vist fig. 18 og fig. 19.

Semilogaritmisk afbildning

Eksempel:

Fra fig. 18 fås: $\Delta s = 0,415$ m, $r_e = 680$ m

Desuden er: $t = 25.620$ min. og
 $Q = 2,54 \times 10^{-2}$ m³/sek. eller 91,5 m³/h.

Ved indsættelse af disse værdier i formlerne (14) og (15) kan T og S beregnes:

$$T = \frac{0,366 \times 2,54 \times 10^{-2}}{0,415} = 2,24 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{sek.}$$

$$S = \frac{135 \times 2,24 \times 10^{-2} \times 25620}{462400} = 1,7 \times 10^{-1}$$

eller specifik ydelse = 17%.

Logaritmisk afbildning

Eksempel:

Ved superposition af Theis' typekurve fig. 5 over datakurven fig. 19 vælges match-point, og dobbeltkoordinaterne aflæses som angivet på figuren. Indsat i formlerne (16) og (17) fås:

$$T = \frac{7,95 \times 10^{-2} \times 2,54 \times 10^{-2} \times 1}{0,096} = 2,1 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{sek.}$$

$$S = \frac{240 \times 2,1 \times 10^{-2} \times 1}{700.000} = 1,85 \times 10^{-1}$$

eller specifik ydelse = 18,5%

De fundne værdier af T og S ved de forskellige metoder (se tabel 4) er alle af samme størrelsesorden, uanset hvilken metode, der er benyttet ved beregningen. Dette må tages som et udtryk for, at de fundne værdier kan anses for at være repræsentative for det vandførende lags hydrauliske egenskaber. De to største T-værdier og de tilsvarende lave S-værdier skyldes uden tvivl forsinket vandafgivelse fra det vandførende lag, og de bør derfor, som tidligere nævnt, ikke benyttes ved prognoser over den fremtidige afsenkning.

Stigningsdata

I tilfælde, hvor der ikke foreligger tilstrækkelige observationer over sænkningen af grundvandstanden under en pumpning, eller hvor pumpekapaciteten under denne ikke har været holdt tilstrækkelig konstant, kan man anvende data for grundvandstandens stigning efter prøvepumpningens ophør for beregning af T og S.

Som illustration af fremgangsmåden ved en sådan beregning vil blive benyttet data for en retableringsperiode efter stop af pumpning i forbindelse med en grundvandssenkning ved Kejlstrupvej nord for Silkeborg.

HYDROGEOLOGISKE FORHOLD

I forbindelse med opføring af en fabriksbygning for A/S K. NECKELMANN blev der udført en grundvandssenkning. På det tidspunkt, da grundvandssenkningen skulle gennemføres, forelå der imidlertid ikke tilstrækkeligt med

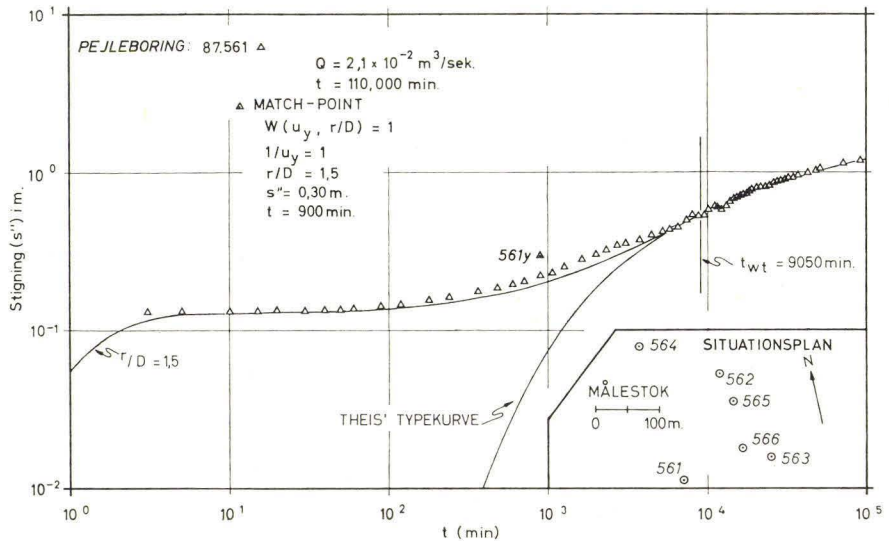


Fig. 20. Dobbeltlogaritmisk afbildning af data for tidstigning fra retableringsperioden i boring DGU ark. nr. 87.561, Kejlstrupvej, Silkeborg kommune, med situationsplan over boringernes beliggenhed.

Fig. 20. Logarithmic plot of time-recovery data for observation well DGU File No. 87.561 after stop of pumping. Kejlstrupvej, Silkeborg Water Supply, with a situation map.

observationsboringer i området. Derfor kunne de nødvendige sænkingsdata under selve pumpningen ikke fremskaffes. Det blev da besluttet at udføre en række observationsboringer, mens grundvandssænkningen foregik, således at der ville være mulighed for at gennemføre målinger af grundvandstandens stigning fra det tidspunkt, pumpningen standsede. Derfor blev der udført 6 observationsboringer, der alle blev udstyret med registrerende vandstands-målere (situationsplan fig. 20).

Det vandførende lag, der er truffet i alle boringer, udgøres af smeltevands-sand og -grus med en kornstørrelse for D_{60} omkring 0,5 mm. Det vandførende lag er underlejret af tertiært glimmerfinsand med D_{60} omkring 0,15 mm, hvorfor kun smeltevandsaflejringerne kan betragtes som tilstrækkeligt vandførende med henblik på vandindvinding.

Da det vandførende lag ikke er dækket af lerlag, har grundvandsreservoirret frit vandspejl. Det skal dog bemærkes, at tilstedeværelsen af relativ tynde lerlag i det vandførende lag er konstateret i enkelte af boringerne, hvilket har medført, at vandspejlet i disse er underkastet en barometereffekt på fra 18–45%.

Mægtigheden af den mættede del af det vandførende lag vokser fra 5–9 m i retningen fra NV mod SØ.

Sænkingsmulighederne er derfor meget begrænsede, og selv mindre sænkninger vil udgøre en væsentlig del af den mættede zone.

Som eksempel på de gennemborede jordlag kan følgende boreprofil gives:

Tabel 6. Værdier for vandstandsstigning, lufttryksændring og korrektioner for barometer-effekt og aftagende mægtighed af det vandførende lag under retableringsperioden i boring DGU ark. nr. 87.561, Kejlstrupvej, Silkeborg kommune, den 22/9–5/12 1969.

Table 6. Recovery data, changes in atmospheric pressure, corrections for barometric efficiency and decrease in saturated thickness for observation well DGU File No. 87.561, for the period September 22nd–December 5th 1969, Kejlstrupvej, Silkeborg Water Supply.

Dato	kl.	Tid (t) min.	Stigning (s'') cm	ΔP mm Hg	BE = 19 % ΔW cm	s'' cm for BE	$\frac{(s'')^2}{2}$ cm	s'' _m cm	
22/9	2030			Stop af pumpning.					
		3	0,15				13,0	13,2	
		5	0,17				13,0	13,2	
		10	0,18				13,0	13,2	
		15	0,17				13,0	13,2	
		20	0,20				13,0	13,2	
		30	0,25				13,0	13,3	
		40	0,38				13,0	13,4	
		50	0,55	+0,6	0,3	0,85	13,0	13,9	
		60	0,7	+0,8	0,4	1,1	12,9	13,9	
		65	0,7	+1,0	0,4	1,1			
		70	0,7	+0,8	0,4	1,1			
		90	0,8	+1,0	0,4	1,2	12,8	14,0	
		120	1,3	+1,3	0,5	1,8	12,7	14,5	
		180	2,2		0,8	3,0	12,5	15,5	
23/9	0030	240	2,9	+2,6	1,1	4,0	12,3	16,3	
		360	4,3	+2,9	1,2	5,5	12,0	17,5	
		480	5,6		1,3	6,9	11,7	18,6	
		600	6,8		1,4	8,2	11,5	19,7	
		720	7,6	+3,9	1,6	9,2	11,3	20,5	
		900	9,2	+4,9	2,0	11,2	10,9	22,1	
		1080	10,6	+5,3	2,2	12,8	10,6	23,4	
		1290	12,3	+6,5	2,7	15,0	10,2	25,2	
		1650	15,1	+8,0	3,3	18,4	9,6	28,0	
		24/9	6	2010	17,6	+7,8	3,2	20,8	9,2
12	2370			20,0	+8,3	3,4	23,4	8,7	32,1
18	2730			22,7	+7,3	3,0	25,7	8,3	34,0
24	3090			25,2	+6,0	2,4	27,6	8,0	35,6
25/9	12	3810	28,7	+1,2	0,5	29,2	7,8	37,0	
		24	4530	31,9	+2,9	1,2	33,1	7,2	40,3
26/9	12	5250	35,8	-1,0	-0,4	35,4	6,8	42,2	
		24	5970	40,3	-8,0	-3,3	37,0	6,6	43,6
27/9	12	6690	40,3	-7,2	-2,9	38,4	6,4	44,8	
		24	7410	43,2	+2,0	0,7	43,9	5,6	49,5
28/9	12	8130	48,3	+2,0	0,7	49,0	4,9	53,9	
		24	8850	52,0	-9,7	-4,0	48,0	5,0	53,0
29/9	12	9570	51,2	-6,0	-2,4	48,8	5,0	53,8	
		24	10290	53,2	+0,4	1,6	54,8	4,2	59,0
30/9	12	11010	57,2			57,2	4,0	61,2	
		24	11730	60,1	-8,0	-3,7	56,4	4,1	60,5
1/10	12	12450	59,7	-11,5	-4,7	55,0	4,2	59,2	
		24	13170	61,1	-7,0	-3,9	57,2	4,0	61,2

Dato	Kl.	Tid (t) min.	Stigning (s'') cm	ΔP mm Hg	BE = 19% ΔW cm	s'' cm for BE	$\frac{(s'')^2}{2}$ cm	s'' cm
2/10	12	13890	63,2	-4,0	-1,6	51,6	3,5	65,1
	24	14610	65,2	-1,0	-0,4	64,8	3,2	68,0
3/10	12	15330	66,5	-1,0	-0,4	66,1	3,0	69,1
	24	16050	68,4	-1,2	-0,5	67,9	2,8	70,7
4/10	12	16770	69,2	+1,0	0,4	69,6	2,7	72,3
	24	17490	70,0	+4,0	1,6	71,6	2,5	74,1
5/10	12	18210	71,6	+7,0	2,9	74,5	2,3	76,8
	24	18930	73,0	+7,4	3,0	76,0	2,1	78,1
6/10	12	19650	74,8	+6,2	2,5	77,3	2,0	79,3
	24	20370	76,1	+4,8	2,0	78,1	2,0	80,1
7/10	12	21090	77,0	+3,4	1,4	78,4	2,0	80,4
	24	21810	78,0	} 1)				
8/10	24	23250	80,2					
9/10	24	24690	81,7					
10/10	24	26130	84,3					
11/10	24	27570	85,8					
12/10	24	29010	88,1					
13/10	24	30450	89,8					
14/10	24	31890	90,8					
16/10	24	34770	93,5					
18/10	24	37650	95,7					
22/10	24	43410	99,8					
26/10	24	49170	103,2					
29/10	24	52590	106,0					
7/11	10	72690	112,5					
11/11	10	91410	119,5					
18/11	10	103030	121,5					
5/12	10	113210	122,5					

1) I denne periode er korrektion af den målte stigning i vandstanden ikke medtaget, da den er uden betydning for beregningerne ved den valgte typekurvemetode.

DGU ark. nr. 87.561

Udført august 1969 af V. STOFFREGEN, Silkeborg.

0- 1,0 m sand, usorteret, stenet

- 4,0 m smeltevandssand, fint-finsandet
- 8,0 m smeltevandssand og -grus
- 12,0 m smeltevandssand, fint-mellemkornet
- 13,0 m smeltevandsfinsand
- 17,6 m glimmerfinsand
- 18,0 m glimmerler.

Vandrejsning 5/9 1969 8,0 m under terræn.

Borediameter: 6'' til 18,0 m.

Forerør: 4" PVC rør fra 0,75 m over terræn til 17,6 m under terræn med perforationer i intervallet fra 7 til 13 m under terræn.

Grundvandssænkningen blev gennemført ved pumpning med en gennemsnitlig kapacitet på 75,5 m³/h i perioden 8/7–22/9 1969 fra 2 borer. Pumpeboringerne er beliggende så nær hinanden, at de kan betragtes som liggende i samme punkt.

Værdier for stigningen af vandstanden efter stop af pumpning i en af de 6 observationsboringer, DGU ark. nr. 87.561, er vist i tabel 6.

Da sænkningen i pumpeperioden udgør henvend $\frac{1}{3}$ af det vandførende lags mægtighed, er en korrektion af stigningsdata for aftagende mægtighed af det vandførende lag i pumpeperioden derfor nødvendig.

KORREKTION FOR AFTAGENDE MÆGTIGHED

Målte værdier for stigningen af vandstanden er korrigeret for barometereffekt (19%) ved hjælp af formel (5) og derefter korrigeret for aftagende mægtighed af det vandførende lag under pumpeperioden ved hjælp af nedenstående formel, der er udviklet og første gang benyttet af forfatterne:

$$s''_m = s'' + \frac{(s')^2}{2m}, \text{ m} \quad (28)$$

hvor: s''_m = korrigeret stigning, m
 s'' = målt stigning, m
 s' = residualsænkningen, m
 m = den oprindelige mægtighed af det vandførende lag, m.

Eksempel:

Fra tabel 6 under den 5/10 1969 kl. 24.00 fås:

Stigning korrigeret for BE

$$s'' = 0,76 \text{ m}, s' = 0,51 \text{ m}, m = 6,15 \text{ m}$$

Indsat i formel (28) fås:

$$s''_m = 0,76 + \frac{0,51^2}{2 \times 6,15} = 0,781 \text{ m}$$

TID-STIGNING

Logaritmisk afbildning

De således korrigerede værdier for stigningen af vandspejlet efter stop af pumpning er givet i tabel 6 og grafisk afbildet på dobbeltlogaritmisk papir, som vist fig. 20.

Ved superposition af højre halvdel af typekurven fig. 4 over datakurven fig. 20 vælges match-point, og dobbeltkoordinater for dette aflæses på såvel typekurve som datakurve.

Eksempel:

Typekurvekoordinater:

$$\begin{aligned}W(u_y, r/D) &= 1 \\ 1/u_y &= 1 \\ r/D &= 1,5\end{aligned}$$

Datakurvekoordinater:

$$s'' = 0,30 \text{ m}, t = 900 \text{ min.}$$

Desuden er:

$$\begin{aligned}Q &= 2,1 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{sek. eller } 75,5 \text{ m}^3/\text{h} \\ r &= 100 \text{ m}\end{aligned}$$

Indsættes disse værdier i formlerne (12) og (13) kan T og S findes:

$$\begin{aligned}T &= \frac{7,95 \times 10^{-2} \times 2,1 \times 10^{-2} \times 1}{0,30} = 5,56 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sek.} \\ S_y &= \frac{240 \times 5,56 \times 10^{-3} \times 900 \times 1}{10.000} = 1,2 \times 10^{-1} \\ &\text{eller specifik ydelse} = 12\%.\end{aligned}$$

Ved hjælp af formel (26) og (27) samt fig. 17 og fig. 20 kan t_{wt} beregnes:

Fra fig. 20 fås:

$$r/D = 1,5, t = 900 \text{ min.}, 1/u_y = 1$$

indsat i formel (26) fås:

$$\alpha = \frac{1,5^2 \times 1}{4 \times 900} = 6,25 \times 10^{-4}$$

Fra fig. 17 og $r/D = 1,5$ fås $\alpha t_{wt} = 5,75$.

Indsættes disse værdier i formel (27) fås:

$$t_{wt} = \frac{5,75}{6,25 \times 10^{-4}} = 9.050 \text{ min.}$$

Da den valgte superposition er foretaget på stigningsdata efter dette tidspunkt (se fig. 20), må de fundne værdier af T og S anses for at være korrekt beregnede.

AFSTAND-STIGNING

Værdier for stigningen af vandstanden i observationsboringerne ved Kejlstrupvej ved slutningen af retableringsperioden er vist i tabel 7 som funktion af afstanden fra pumpeboringerne. Det skal bemærkes, at retableringsperioden er valgt af samme længde som pumpeperioden, hvilket vil sige 76 døgn eller $t = 110.000 \text{ min.}$

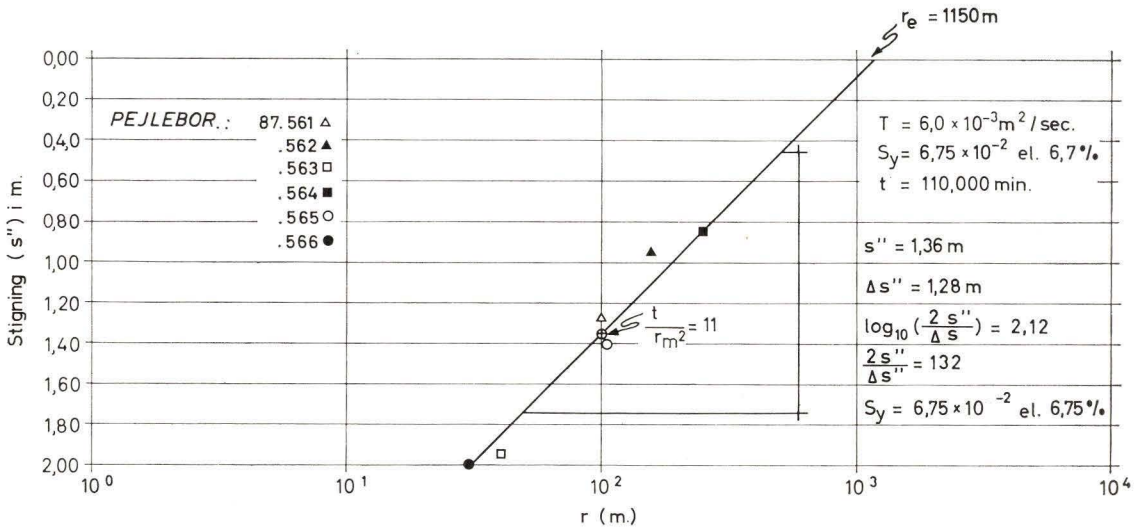


Fig. 21. Semilogaritisk afbildning af data for afstand – stigning i observationsboringer ved Kejlstrupvej, Silkeborg kommune.

Fig. 21. Semilogarithmic plot of distance-recovery data for observation wells at Kejlstrupvej, Silkeborg Water Supply.

Tabel 7. Stigningen i vandstanden under retableringsperioden. Området ved Kejlstrupvej, Silkeborg kommune, den 22/9–4/12 1969.

Table 7. Recovery data for the period September 22nd–December 4th 1969, Kejlstrupvej, Silkeborg Water Supply.

Observationsboring DGU ark. nr. på Atlasblad 87	561	562	563	564	565	566
Silkeborg komm. nr.	OW ₄	OW ₃	OW ₆	OW ₇	OW ₂	OW ₁
Afstand til pumpe- boringerne DGU ark. nr. 87.569 og 570, m	100	155	40	250	105	30
Stigning, m	1,27	0,95	1,95	0,85	1,40	2,00

Semilogaritisk afbildning

De ovennævnte stigninger som funktion af afstanden til de enkelte boringer er afbildet fig. 21.

Fra en ret linie trukket gennem de afbildede punkter findes $\Delta s'' = 1,28 \text{ m}$.
 Indsættes denne værdi i formel (14) fås:

$$T = \frac{0,366 \times 2,1 \times 10^{-2}}{1,28} = 6,0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sek.}$$

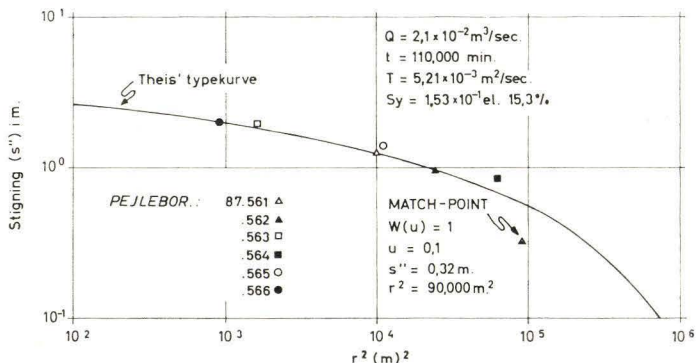


Fig. 22. Dobbeltlogaritmisk afbildning af data for afstand – stigning i observationsboringer ved Kejlstrupvej, Silkeborg kommune.

Fig. 22. Logarithmic plot of distance-recovery data for observation wells from Kejlstrupvej, Silkeborg Water Supply.

S beregnes ved hjælp af nedenstående formel:

$$S = \frac{135 \times T \times (t/r_m^2)}{\log_{10}^{-1} (2s''/\Delta s'')} \quad (29)$$

hvor: r_m = afstanden for et vilkårligt valgt punkt på den rette linie gennem de afbildede punkter.

Eksempel:

Fra fig. 21 fås:

$$\begin{aligned} t &= 110.000 \text{ min.}, & \Delta s'' &= 1,28 \text{ m}, \\ s'' \text{ (for } r_m) &= 1,36 \text{ m}, & r_m^2 &= 10.000 \text{ m}^2, \\ T &= 6,0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sek.} \end{aligned}$$

Indsættes disse værdier i formel (29) fås:

$$S = \frac{135 \times 6,0 \times 10^{-3} \times 110.000/100^2}{\log_{10}^{-1} (2 \times 1,36/1,28)} = 6,75 \times 10^{-2}$$

eller specifik ydelse = 6,75%.

Det er også muligt at bestemme S ved hjælp af formel (15).

Eksempel: Fra fig. 21 fås: $r_e = 1.150 \text{ m}$

Desuden er:

$$T = 6,0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sek.}, t = 110.000 \text{ min.}$$

Indsættes disse værdier i formel (15) fås:

$$S = \frac{135 \times 6,0 \times 10^{-3} \times 110.000}{1.150^2} = 6,75 \times 10^{-2}$$

eller specifik ydelse = 6,75%.

Tabel 8. Oversigt over beregnede, hydrauliske egenskaber for det vandførende lag i området ved Kejlstrupvej, Silkeborg kommune.

Table 8. Values of the hydraulic properties of the aquifer at Kejlstrupvej, Silkeborg Water Supply.

	Tid-sænkning	Afstands-sænkning					
	Logaritmisk afbildning	Semilogaritmisk afbildning			Logaritmisk afbildning		
Observationsboring DGU ark. nr. på atlasblad 87	561	561	562	563	564	565	566
Silkeborg komm. nr.	OW ₄	OW ₄	OW ₃	OW ₆	OW ₇	OW ₂	OW ₁
$T \times 10^{-3}$ m ² /sek.	5,56	6,0			5,21		
$S_y \times 10^{-1}$	1,2	0,67			1,53		

Logaritmisk afbildning

Værdier af stigningen ved slutningen af retableringsperioden, som givet i tabel 7, plottes på dobbeltlogaritmisk papir, som vist fig. 22.

Ved superposition af typekurven fig. 5 over datakurven fig. 22 vælges match-point, og dettes dobbeltkoordinater aflæses.

Eksempel:

Typekurvekoordinater: $W(u) = 1$, $u = 0,1$

Datakurvekoordinater:

$$s'' = 0,32 \text{ m}, r^2 = 90.000 \text{ m}^2$$

Desuden er:

$$Q = 2,1 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{sek.}, t = 110.000 \text{ min.}$$

Indsættes disse værdier i formlerne (16) og (17) fås:

$$T = \frac{7,95 \times 10^{-2} \times 2,1 \times 10^{-2} \times 1}{0,32} = 5,21 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sek.}$$

$$S = \frac{240 \times 5,21 \times 10^{-3} \times 110.000 \times 0,1}{90.000} = 1,53 \times 10^{-1}$$

eller specifik ydelse = 15,3%.

De beregnede værdier for T og S fra data for såvel tid-stigning som afstand-stigning er vist i tabel 8. Det fremgår heraf, at der er god overensstemmelse mellem værdier beregnet ved forskellige metoder.

Disse og andre værdier beregnet på data fra de øvrige observationsboringer i området ved Kejlstrupvej er benyttet ved beregning af den fremtidige sænkning ved en indvinding af 750.000 m³/år fra 3 boringer. De derved fundne sænkninger

Tabel 9. Oversigt over tekniske data fra boringer ved Hvinningdal, Silkeborg kommune.
 Table 9. Technical data of wells from Hvinningdal area, Silkeborg Water Supply.

DGU ark. nr.	Diameter		Top af fore-rør kote m	Terr. kote m	Vandførende lag		Filterudbygning (PVC)					Bor. slut- dyb. m
	Bore- rør	Fore- rør			Interval kote m fra-til	Mægtig- hed m	Dia- meter	Interval kote m fra-til	Længde m	Slidsbr. mm	Grusk. mm	
87.551	8"	6"	46,08	44,65	42,45 – 25,05 19,65 – 7,15	17,7 12,5	4"	13,65 – 8,65	5	1	–	37,5
87.552	8"	6"	49,19	48,22	45,12 – 23,22 22,22 – 10,22	21,9 12,0	4"	15,22 – 10,22	5	1	–	38,0
87.553	8"	6"	48,85	48,01	44,01 – 1,51 ÷1,49 – ÷7,99	42,5 6,5	4" 4"	23,01 – 17,01 8,01 – 3,01 ÷3,99 – ÷7,99	13	1	–	56,0
87.554	12"	8"	50,21	50,75	45,50 – 40,30 58,10 – 35,30 34,80 – 23,30 12,30 – ÷5,70	5,2 2,8 11,5 18,0	8"	10,30 – ÷5,70	16	1	2–3	57,0

Tabel 10. Værdier for sænkning og kapacitet som funktion af tiden i boring DGU ark. nr. 87.554, Hvinningdal, Silkeborg kommune.

Table 10. Drawdown data and discharge during pumping test on well DGU File No. 87.554, Hvinningdal area, Silkeborg Water Supply.

Dato	Kl.	Tid (t) min.	Sænk. (s) m	Vandmængde (Q)	
				lit.	sek.
16/4-69	11,55	0	0		
	12,30	0,5	3,15		
		1	3,26	1000	35,5
		1,5	3,34	500	18,0
		2	3,40		
		3	3,50	1000	35,3
		4	3,54	1000	35,8
		5	3,585	1000	35,5
		6	3,615	1000	35,4
		7	3,645	1000	35,5
		8	3,675	2000	71,2
		9	3,70	1000	35,7
		10	3,72	1000	35,6
		12	3,75		
		14	3,785		
		16	3,815		
		18	3,845		
		20	3,865		
		25	3,91		
		30	3,96		
	35	3,995			
	40	4,025			
	50	4,075			
	60	4,115			
	75	4,175			
	90	4,210			
	14,30	120	4,285		
	15,00	150	4,325		
	15,30	180	4,360		
	16,30	240	4,415	1000	36,0
	17,30	300	4,460	1000	36,0
	19,30	420	4,515	1000	36,0
	21,30	540	4,555	1000	36,0
	23,30	660	4,575	1000	36,0
17/4-69	07,30	1140	4,615	1000	36,0
	13,30	1500	4,585	1000	35,6
	19,30	1860	4,61	1000	35,7
18/4-69	07,30	2580	4,615	1000	35,7
	13,30	2940	4,655	1000	36,0

Kl. ca. 14,00 er prøvepumpningen standset på grund af en knækket pumpeaksel.

viser, at de vandførende lag må anses for at kunne yde den ønskede vandmængde ved de tilladelige sænkninger.

ARTESISK GRUNDEVANDSRESERVOIR

HYDROGEOLOGISKE FORHOLD

Som eksempel på beregning af et artesisk grundvandsreservoirs hydrauliske egenskaber (T) og (S) samt den vertikale permeabilitet af det omgivende lag (P') vil en prøvepumpning på DGU ark. nr. 87.554, Silkeborg vandværk, Hvinningdal, blive benyttet. Der vil endvidere blive benyttet pejledata fra 3 andre boringer i området, DGU ark. nr. 87.551, 552 og 553 (situationsplan se fig. 26).

Af de gennemborede jordlag i disse boringer fremgår det, at der findes 2 vandførende lagserier, en øvre bestående af smeltevandsaflejringer af kvartær alder, og en nedre bestående af kvartssand og -grus af tertiær alder. De to lagserier er i de fleste boringer adskilt ved vandstandsende eller svagt permeable lag af glimmerler, glimmerfinsand, brunkul eller moræneler.

Det nedre grundvandsreservoir er artesisk med lækage fra det øvre, og vandspejlet i de forskellige boringer påvirkes af lufttrykændringer med en barometereffekt på omkring 30%. Udvalgte data fra de enkelte boringer er givet i tabel 9.

Værdier for sænkningen i såvel pumpeboring som observationsboringer under prøvepumpning den 16/4.-18/4 1969 er vist i tabellerne 10 og 11. På fig. 23 er vist et diagram med vandstand og lufttryk for denne periode.

TID-SÆNKNING

Semilogaritmisk afbildning

Værdier for sænkningen i pumpe- og observationsboringer fra tabellerne 10 og 11 er plottet på semilogaritmisk papir, som vist fig. 24 og 25.

Fra fig. 24 fås $\Delta s = 0,525$ m. Ved indsættelse af denne samt $Q = 2,78 \times 10^{-2}$ m³/sek. i formel (10) kan T findes for pumpeboringen som:

$$T = \frac{0,183 \times 2,78 \times 10^{-2}}{0,525} = 9,6 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sek.}$$

Fig. 23. Diagram over registreret vandstand i observationsboring DGU ark. nr. 87.553 og lufttryk under prøvepumpning på boring DGU ark. nr. 87.554, Hvinningdal, Silkeborg kommune, den 16-18/4 1969. Formindsket 1,8 ×.

Fig. 23. Hydrograph of observation well DGU File No. 87.553 and air pressure during pumping test on well DGU File No. 87.554 for the period April 16th-18th 1969, Hvinningdal area, Silkeborg Water Supply. Diminished 1,8 times.

Pegel zu (3,85m)

an der 553 TOP AF BØE

Aufzeichnung vom 15.4. bis 19.4.69.

Maßstab 1:10; 16.4. 11⁴⁷ 1:20

PRØVEPUMPNING MED TRINNIS
VARIERET KAPACITET PÅ BØR DQU
ARK. NR. 87554

Papier Nr. 403 R 23 von A. Ott. Kempen (Batern) D

15-4

11⁴⁷

13⁰⁰

11⁴⁷

13¹⁵

13²⁵

13³⁵

13⁴⁵

13⁵⁵

14⁰⁵

14¹⁵

14²⁵

14³⁵

14⁴⁵

14⁵⁵

15⁰⁵

15¹⁵

15²⁵

15³⁵

15⁴⁵

15⁵⁵

16⁰⁵

16¹⁵

16²⁵

16³⁵

18-4

11⁴⁷

13¹⁵

ca. kl. 14 PRØVEPUMPNING STANDSET

PRØVEPUMPNING PÅ BØR DQU ARK.
NR. 87554
START 16.4. kl. 12⁰⁰
STOP 18.4. ca. kl. 14

VERTIKALE
MÅLETOG

1:10

1:20

1:20

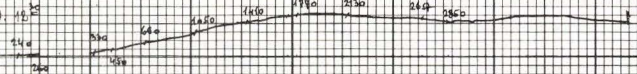
UGEDIAGRAM

DEGEDIAGRAM

UKEDIAGRAM

LUFTRYKKET (?) i mm. Hg

REFERENCE LUFTRYKKET 16/4/69. 12⁰⁰



2 4 6 8 10 14 16 18 20 22 2 4 6 8 10 14 16 18 20 22 2 4 6 8 10 14 16 18 20 22 2 4 6 8 10 14 16 18 20 22 2 4 6 8 10 14 16 18 20 22 2 4 6 8 10 14 16 18 20 22 2 4 6 8 10 14 16 18 20 22 2 4 6 8 10 14 16 18 20 22

Montag

Dienstag

Mittwoch

Donnerstag

Freitag

Samstag

Sonntag

Montag

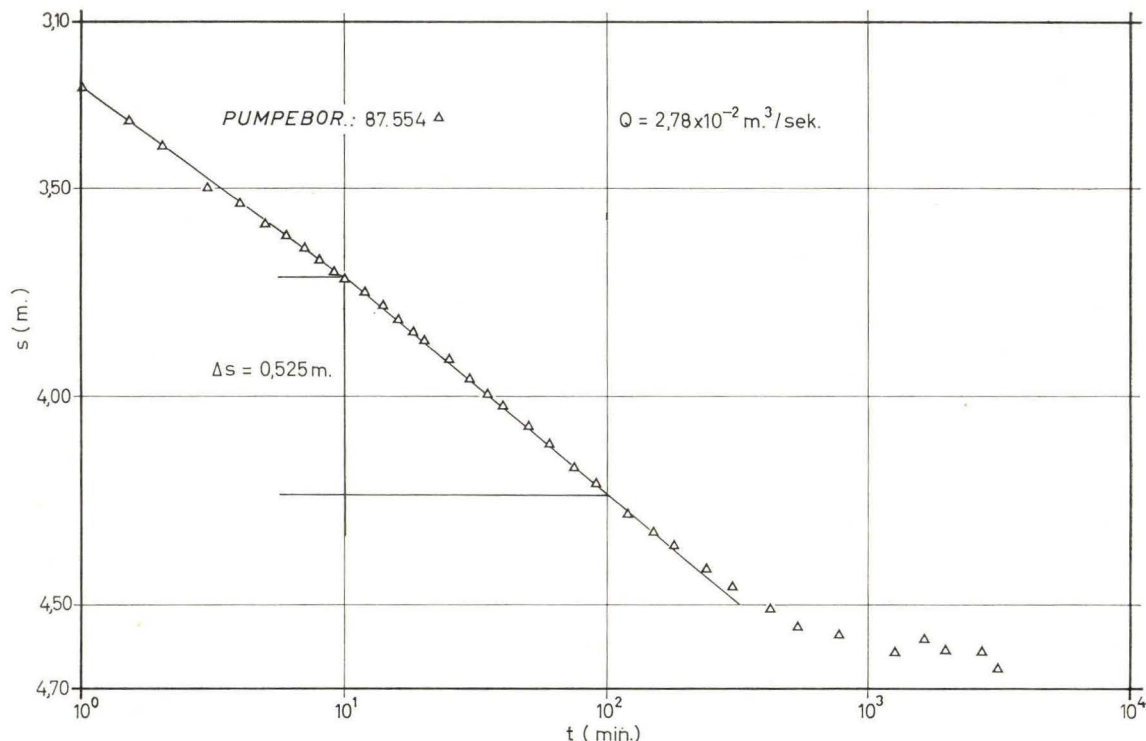


Fig. 24. Semilogaritmisk afbildning af data for tid – sænkning i pumpeboring DGU ark. nr. 87.554, Hvinningdal, Silkeborg kommune, den 16–18/4 1969.

Fig. 24. Semilogarithmic plot of time-drawdown data for pumping well DGU File No. 87.554 during pumping test for the period April 16th–18th 1969, Hvinningdal area, Silkeborg Water Supply.

T-værdier baseret på data fra observationsboringerne kan beregnes på lignende måde ved at aflæse de respektive værdier for Δs på fig. 25 og indsætte disse sammen med værdien for Q i formel (10). Resultatet af disse beregninger er givet i tabel 12.

Beregning af magasinkoefficienten S kan kun foretages på basis af sænkningen i observationsboringerne. Som eksempel vil data fra boring DGU ark. nr. 87.553 blive benyttet.

Eksempel:

Fra fig. 25 fås:

$$t_0 = 2,2 \text{ min.}$$

og fra tabel 12 fås:

$$T = 9,95 \times 10^{-3} \text{ m /sek.}$$

og

$$r = 84 \text{ m.}$$

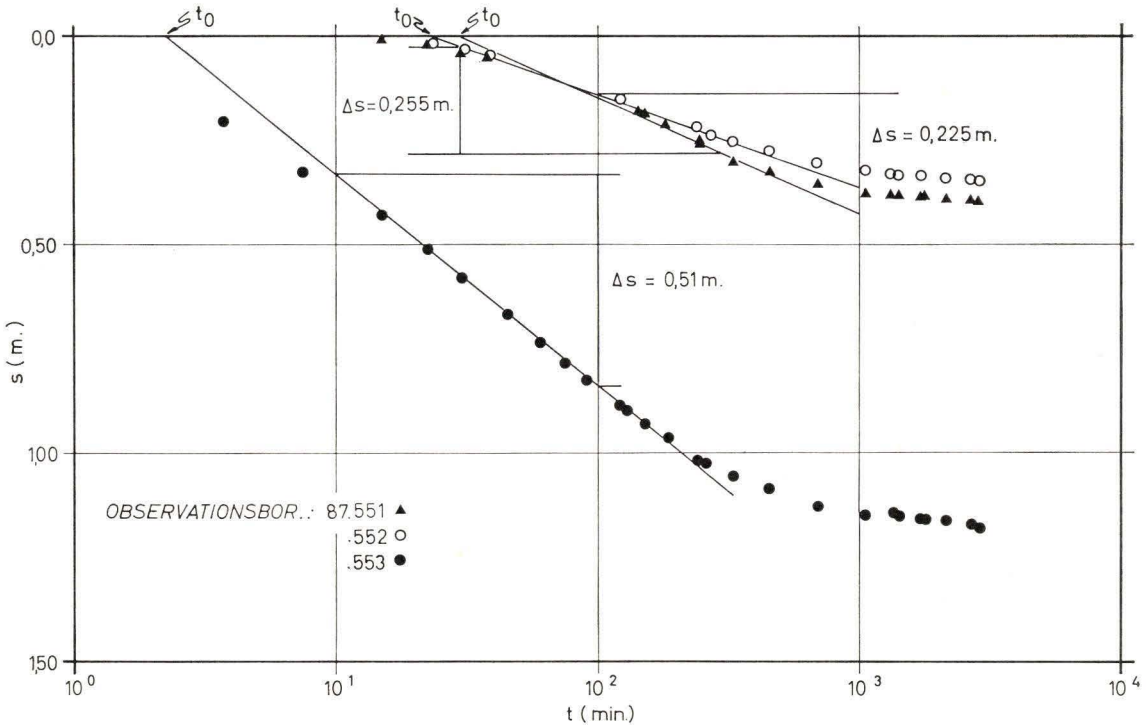


Fig. 25. Semilogarithmisk afbildning af data for tid – sænkning i observationsboringer ved Hvinningdal, Silkeborg kommune under prøvepumpning på boring DGU ark. nr. 87.554.
 Fig. 25. Semilogarithmic plot of time-drawdown data for observation wells during pumping test on well DGU File No. 87.554 for the period April 16th-18th 1969, Hvinningdal area, Silkeborg Water Supply.

Tabel 12. Værdier for transmissivitet (T), magasinkoefficient (S) og vertikal permeabilitet af omgivende lag (P') for det artesiske grundvandsreservoir ved Hvinningdal, Silkeborg kommune.
 Table 12. Coefficients of transmissivity (T), storage (S) and vertical permeability (P') of the aquifer at Hvinningdal, Silkeborg Water Supply.

	Tid-sænkning							Afstand-sænkning		
	Semilogarithmisk afbildning				Logarithmisk afbildning			Logarithmisk afbildning		
Observationsboring DGU ark. nr. på atlasblad 87	551	552	553	554	551	552	553	551	552	553
$T \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{sek.}$	1,8	2,38	0,995	0,96	1,05	1,58	1,1		0,915	
$S \times 10^{-4}$	37,0	38,6	4,23		43,0	62,5	3,8			
$P' \times 10^{-7} \text{ m/sek.}$					10,6	4,8	0,4		0,715	

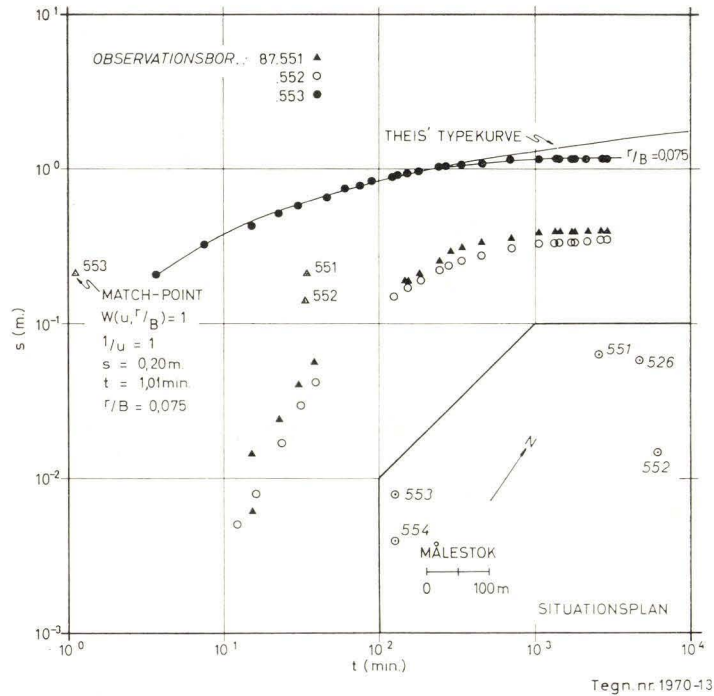


Fig. 26. Dobbeltlogaritmisk afbildning af data for tid – sænkning for observationsboringer ved Hvinningdal, Silkeborg kommune under prøvepumpning den 16–18/4 1969 på DGU ark. nr. 87.554 med situationsplan over boringernes beliggenhed.

Fig. 26. Logarithmic plot of time-drawdown data for observation wells during pumping test on well DGU File No. 87.554 for the period April 16th–18th 1969, Hvinningdal area, Silkeborg Water Supply, with a situation map.

Indsættes disse værdier i formel (11) fås:

$$S = \frac{135 \times 9,95 \times 10^{-3} \times 2,2}{84^2} = 4,23 \times 10^{-4}$$

Værdier for S beregnet på basis af observationer i de øvrige boringer er vist i tabel 12.

Logaritmisk afbildning

Værdier af sænkningen, som givet i tabel 11, er afbildet på dobbeltlogaritmisk papir, som vist fig. 26.

Ved superposition af typekurven fig. 6 over datakurverne fig. 26 og valg af match-point for hver datakurve kan koordinater for såvel typekurve som datakurver aflæses.

Som eksempel skal benyttes match-point-koordinater for observationsboring DGU ark. nr. 87.553 som vist fig. 26.

Tabel 13. Værdier for afstand – sænkning i observationsboringerne ved slutningen af prøvepumpningen på boring DGU ark. 87.554, Hvinningdal, Silkeborg kommune, den 18/4 1969.

Table 13. Distance-drawdown data for the observation wells at the end of the pumping test on well DGU File No. 87.554, April 18th 1969, Hvinningdal area, Silkeborg Water Supply.

Observationsboring DGU ark. nr. på atlasblad 87	526	551	552	553
Afstand til pumpeboring DGU ark. nr. 87.554, m	488,46	445,29	447,38	83,74
Sænkning, m	0,35	0,40	0,35	1,18

Eksempel:

Typekurvekoordinater:

$$W(u, r/B) = 1$$

$$1/u = 1$$

Datakurvekoordinater:

$$s = 0,20 \text{ m}$$

$$t = 1,01 \text{ min.}$$

Desuden er:

$$Q = 2,78 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{sek.}$$

$$r = 84$$

$$m' = 5 \text{ m}$$

Indsættes disse værdier i formlerne (18) og (19) fås:

$$T = \frac{7,95 \times 10^{-2} \times 2,78 \times 10^{-2} \times 1}{0,20} = 1,1 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{sek.}$$

$$S = \frac{240 \times 1,1 \times 10^{-2} \times 1,01 \times 1}{84^2} = 3,8 \times 10^{-4}$$

P' bestemmes ved hjælp af størrelsen r/B , som findes fra typekurveskaren fig. 6 ved superposition over datakurverne fig. 26. Værdien r/B er værdien for den typekurve, som giver den bedste dækning af datakurven.

Eksempel:

På fig. 26 er indtegnet typekurven for $r/B = 0,075$, hvilket er den typekurve, som giver den bedste dækning af datakurven. Denne og følgende værdier:

$$T = 1,1 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{sek.}$$

$$r = 84 \text{ m}$$

$$m' = 5 \text{ m}$$

indsættes i formel (20), hvorved fås:

$$P' = \frac{0,075^2 \times 1,1 \times 10^{-2} \times 5}{84^2} = 4,0 \times 10^{-8} \text{ m/sek.}$$

De fundne værdier af T , S og P' for alle observationsboringer er vist i tabel 12.

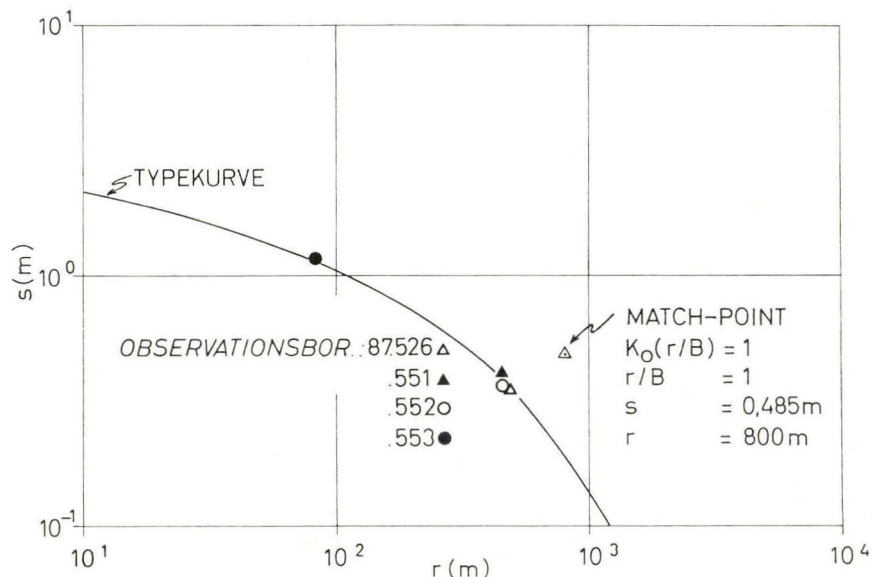


Fig. 27. Dobbeltlogaritmisk afbildning af afstand – sænkning for observationsboringer ved Hvinningdal, Silkeborg kommune under prøvepumpning på boring DGU ark. nr. 87.554, den 16–18/4 1969.

Fig. 27. Logarithmic plot of distance-drawdown data for observation wells during pumping test on well DGU File No. 87.554 for the period April 16th–18th 1969, Hvinningdal area, Silkeborg Water Supply.

AFSTAND-SÆNKNING

Logaritmisk afbildning

Værdier for sænkningen ved pumpeperiodens slutning, som vist i tabel 13, plottes på dobbeltlogaritmisk papir, som vist fig. 27.

Ved superposition af typekurven fig. 7 over datakurven fig. 27 vælges match-point, og koordinater for såvel typekurve som datakurve aflæses.

Eksempel:

Typekurvekoordinater:

$$K_0(r/B) = 1 \text{ og } r/B = 1$$

Datakurvekoordinater:

$$s = 0,485 \text{ m, } r = 800 \text{ m}$$

Desuden er:

$$Q = 2,78 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{sek.}$$

Indsættes disse værdier i formel (21) fås:

$$T = \frac{0,159 \times 2,78 \times 10^{-2} \times 1}{0,485} = 9,15 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sek.}$$

Den vertikale permeabilitet (P') kan endvidere bestemmes fra abscissekoordinaterne for det valgte match-point fig. 27.

Eksempel:

Fra fig. 27. fås:

Typekurvekoordinat: $r/B = 1$

Datakurvekoordinat: $r = 800$ m

Desuden er: $T = 9,15 \times 10^{-3}$ m²/sek. og $m' = 5$ m.

Ved indsættelse af disse værdier i formel (20) fås:

$$P' = \frac{1^2 \times 9,15 \times 10^{-3} \times 5}{800^2} = 7,15 \times 10^{-8} \text{ m/sek.}$$

De beregnede værdier for T og P' er vist i tabel 12.

EKSEMPLER PÅ ANVENDELSE AF DE HYDRAULISKE EGENSKABER

Som eksempel på beregningen af den fremtidige sænkning som følge af en given oppumpning vil de ovenfor fundne værdier for de hydrauliske egenskaber for det artesiske grundvandsreservoir ved Hvinningdal blive benyttet.

SÆNKNINGEN I PUMPEBORINGEN

Ved beregning af den selvproducerede afsenkning i pumpeboringen benyttes følgende parametre og værdier for boring DGU ark. nr. 87.554:

$$T = 9,6 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sek. (Tabel 12)}$$

$$S = 3,16 \times 10^{-3} \text{ (gennemsnit af S for observationsboringer)}$$

$$r_w = 0,1 \text{ m (Tabel 9)}$$

$$Q = 2,78 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{sek. eller } 100 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$C = 670 \text{ sek.}^2/\text{m}^5 \text{ og } n = 2 \text{ (Jacob's metode) (Fig. 13) og (Tabel 2)}$$

$$C = 11.250 \text{ sek.}^2/\text{m}^5 \text{ og } n = 2,87 \text{ (Rorabaugh's metode) (Fig. 14) og (Tabel 2)}$$

$$t_1 = 8,64 \times 10^4 \text{ sek.} = 1 \text{ døgn}$$

$$t_2 = 8,64 \times 10^5 \text{ sek.} = 10 \text{ døgn}$$

$$t_3 = 8,64 \times 10^6 \text{ sek.} = 100 \text{ døgn}$$

$$t_4 = 1,55 \times 10^7 \text{ sek.} = 180 \text{ døgn}$$

$$t_5 = 3,15 \times 10^7 \text{ sek.} = 365 \text{ døgn}$$

hvor: t_{1-5} = længden af de pumpeperioder, efter hvilke sænkningen vil blive beregnet.

Ved indsættelse af disse værdier i formel (9) kan den selvproducerede sænkning i pumpeboringen beregnes for hver af de valgte pumpetider (t_{1-5}). Fremgangsmåden ved denne beregning vil blive illustreret for pumpetiden $t_1 = 1$ døgn, og den fundne værdi er sammen med de beregnede værdier for t_{2-5} vist i tabel 16.

Fra formel (9) fås:

$$s_w = \frac{2,78 \times 10^{-2}}{4 \times 3,14 \times 9,60 \times 10^{-3}} \left[2,3 \log_{10} \left(\frac{4 \times 9,6 \times 10^{-3} \times 8,6 \times 10^4}{0,1^2 \times 3,16 \times 10^{-3}} \right) - 0,577 \right] + 670 (2,78 \times 10^{-2})^2 = 4,63 \text{ m (Jacob's metode)}$$

eller $+ 11.250 (2,78 \times 10^{-2})^{2,87} = 4,51 \text{ m (Rorabaugh's metode)}$.

Tabel 14. Udvalgte værdier af $W(u)$ som funktion af u . (Efter WENZEL, 1942).
 Table 14. Selected values of $W(u)$ as a function of u (after WENZEL, 1942).

$N \backslash u$	$N \times 10^{-5}$	$N \times 10^{-4}$	$N \times 10^{-3}$
6,8	9,0189	6,7169	4,4204
6,9	9,0043	6,7023	4,4059
7,0	8,9899	6,6879	4,3916
7,1	8,9757	6,6737	4,3775
7,2	8,9617	6,6598	4,3636

Den målte sænkning efter 1 døgn pumpning (1.440 min.) med den valgte kapacitet kan aflæses på fig. 24 som 4,62 m. Da forskellen mellem den målte og beregnede afsenkning er forsvindende, må de beregnede værdier for borin- gens og det vandførende lags hydrauliske egenskaber være korrekte.

SÆNKNINGEN I OBSERVATIONSBORINGERNE

Sænkningen i grundvandsreservoirret vil blive beregnet i 3 punkter med følgende afstande fra pumpeboringen:

$$\begin{aligned} r_1 &= 84 \text{ m (DGU ark. nr. 87.553)} \\ r_2 &= 445 \text{ m (DGU ark. nr. 87.551)} \\ r_3 &= 447 \text{ m (DGU ark. nr. 87.552)} \end{aligned}$$

Den indbyrdes beliggenhed af disse boringer er vist på fig. 26 og tabel 13.

Sænkningerne vil blive beregnet for samme pumpeperioder som ved foregående eksempel, og fremgangsmåden vil blive demonstreret med data fra boring DGU ark. nr. 87.553 ($r_1 = 84$ m), og pumpeperioden ($t_1 = 1$ døgn). Værdier af sænkningen i de øvrige boringer for de nævnte pumpeperioder (t_1 - t_5) er vist i tabel 16.

Til beregning af sænkningen i grundvandsreservoirret er benyttet de beregnede værdier for de hydrauliske egenskaber T og S baseret på logaritmisk plotning af data for tid-sænkning i observationsboringerne, se tabel 12.

Fra boring DGU ark. nr. 87.553 fås:

$$\begin{aligned} T &= 1,10 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{sek.} \\ S &= 3,8 \times 10^{-4} \end{aligned}$$

Indsættes disse værdier for T og S i formel (2) fås:

$$s_{r1} = \frac{2,78 \times 10^{-2}}{4 \times 3,14 \times 1,10 \times 10^{-2}} W(u) = 0,221 W(u)$$

»Boringsfunktionen« $W(u)$ som funktion af (u) findes ved indsættelse af værdierne $r = r_1 = 84$ m og $t = t_1 = 8,64 \times 10^4$ i formel (3), hvorved (u) findes:

$$u_{r1t1} = \frac{84^2 \times 3,8 \times 10^{-4}}{4 \times 1,10 \times 10^{-2} \times 8,64 \times 10^4} = 7,01 \times 10^{-4}$$

Tabel 15. Beregnede værdier af »boringsfunktionen« $W(u)$ som funktion af u for udvalgte pumpeperioder (t_1 - t_5) og afstande fra pumpeboringen (r_1 - r_3), Hvinningdal, Silkeborg kommune.

Table 15. Values of the "Well function" $W(u)$ for u for selected periods of pumping (t_1 - t_5) and distances (r_1 - r_3) from the pumping well. Hvinningdal area, Silkeborg Water Supply.

		1 døgn	10 døgn	100 døgn	180 døgn	365 døgn
Observationsboring DGU ark. nr. på atlasblad 87		t_1	t_2	t_3	t_4	t_5
553	u_{r1}	$7,0 \times 10^{-4}$	$7,0 \times 10^{-5}$	$7,0 \times 10^{-6}$	$3,9 \times 10^{-6}$	$1,9 \times 10^{-6}$
551	u_{r2}	$2,5 \times 10^{-1}$	$2,5 \times 10^{-2}$	$2,5 \times 10^{-3}$	$1,4 \times 10^{-3}$	$6,8 \times 10^{-4}$
552	u_{r3}	$2,3 \times 10^{-1}$	$2,3 \times 10^{-2}$	$2,3 \times 10^{-3}$	$1,3 \times 10^{-3}$	$6,4 \times 10^{-4}$
553	$W(u_{r1})$	6,69	8,98	11,29	11,88	12,60
551	$W(u_{r2})$	1,04	3,45	5,42	6,00	6,72
552	$W(u_{r3})$	1,11	3,22	5,50	6,07	6,78

Tabel 16. Beregnede sænkninger i pumpeboring og grundvandsreservoir ved pumpning af $100\text{m}^3/\text{h}$ fra boring DGU ark. nr. 87.554, Hvinningdal, Silkeborg kommune. Værdier i () er målt sænkning.

Table 16. Calculated drawdown in pumping well and aquifer by pumping of $100\text{ m}^3/\text{h}$ from well DGU File No. 87.554, Hvinningdal area, Silkeborg Water Supply. Values in () are observed drawdown.

		1 døgn	10 døgn	100 døgn	180 døgn	365 døgn
Observationsboring DGU ark. nr. på atlasblad 87	Tid Sænkning (s) m	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5
554	$+CQ^2$ s_w	4,63 (4,62)	4,92	5,68	5,82	6,01
553	$+CQ^{2,87}$ s_{r1}	4,51 1,40 (1,15)	4,82 1,80	5,56 2,24	5,70 2,38	6,89 2,52
551	s_{r2}	0,22 (0,38)	0,66	1,14	1,26	1,41
552	s_{r3}	0,16 (0,33)	0,45	0,77	0,85	0,95

Værdier af $W(u)$ for (u) foreligger i tabelform (WENZEL, 1942), fra hvilken $W(u)$ kan aflæses for denne værdi af (u) .

Udvalgte værdier fra denne tabel er vist i tabel 14.

For værdien: $u = 7,01 \times 10^{-4}$ fås $W(u) = 6,69$.

Indsættes denne værdi i ligningen:

$$s_{r1} = 0,221 W(u) \text{ fås } s_{r1} = 1,40 \text{ m.}$$

Lignende beregninger er udført på data fra de øvrige borer, og værdier for (u) og $W(u)$ er beregnet og vist i tabel 15.

Efter bestemmelse af størrelserne (u) og $W(u)$ er sænkningerne i de nævnte borer for de valgte pumpeperioder beregnet og vist i tabel 16.

De beregnede værdier for sænkningen efter 1 døgn pumping kan sammenlignes med de virkelige (målte) værdier (i tabel 16 er de målte værdier anført i parentes). God overensstemmelse er opnået for borerne DGU ark. nr. 87.551, 553 og 554.

NEDSIVNING I FORM AF LÆKAGE

Værdier for fremtidige sænkninger for pumpeperioder indtil 1 år er beregnet uden hensyntagen til nedsivningens indflydelse på sænkningen.

Da den årlige nedsivning i dette tilfælde overstiger den oppumpede vandmængde, vil de maksimale sænkninger af grundvandstanden i de valgte punkter i gennemsnit nås efter 180 døgn pumping. Sænkningerne efter 365 døgn pumping er beregnet af hensyn til år med ekstremt lange perioder uden grundvandsdannelse.

Da det undersøgte grundvandsreservoir ved Hvinningdal har vist sig at være et artesiske reservoir med lækage gennem de overliggende, svagt permeable lag, er det muligt at bestemme størrelsen af grundvandsdannelsen (nedsivningen til det artesiske reservoir) ved kendskab til den vertikale permeabilitet (P') af de overliggende lag.

Den vandmængde, som passerer gennem et svagt permeabelt lag, der adskiller et nedre grundvandsreservoir fra et øvre, kan bestemmes, hvis man kender den vertikale permeabilitet (P') af det svagt permeable lag, forskellen mellem grundvandstanden i de 2 reservoirer (Δh) og arealet af det svagt permeable lag (A_L), gennem hvilket nedsivningen foregår. Den gennemsvivende vandmængde (Q_L) kan beregnes af følgende formel:

$$Q_L = \frac{P' \times \Delta h \times A_L}{m'}, \text{ m}^3/\text{sek.} \quad (30)$$

Eksempel:

$$P' = 0,715 \times 10^{-7} \text{ m/sek.}$$

$$m' = 5 \text{ m}$$

$$\Delta h = 1 \text{ m}$$

$$A_L = 7,06 \times 10^6 \text{ m}^2 \text{ (r = 1500 m)}$$

Indsættes disse værdier i formel (30) fås:

$$Q_L = \frac{0,715 \times 10^{-7} \times 1 \times 7,06 \times 10^6}{5} = 1,01 \times 10^{-1} \text{ m}^3/\text{sek.}$$

eller $3,18 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{år}$.

Dette eksempel viser, at grundvandsdannelsen i artesiske reservoirer med lækage i overvejende grad vil ske ved nedsivning gennem de dækkende, svagt permeable lag, når der som følge af oppumpning fra det nedre reservoir skabes en potentialforskel mellem grundvandet i dette og det øvre reservoir.

KONKLUSION

De gennemgående eksempler, hvor der i de formler for sænkningen i forbindelse med pumpning på en boring er indsat værdier fra aktuelle pumpeforsøg i grundvandsforekomster af forskellig reservoirtype, viser, at formlerne er gyldige og anvendelige i praksis ved bestemmelse af et vandførende lags hydrauliske egenskaber. Ud fra kortvarige pumpeforsøg kan koefficienter for grundvandsreservoirets hydrauliske egenskaber, transmissivitet (T), magasinvirkning (S) samt eventuelle dækkende lags vertikale permeabilitet (P') bestemmes.

Med kendskab til disse størrelser kan der opstilles værdifulde prognoser over vandindvindingsmulighederne og disses virkninger såvel i rum som i tid, idet det da er muligt at bestemme den fremtidige sænkning som følge af en given pumpning i en given tid og i en given afstand fra pumpeboringen.

Det vanskeligste ved benyttelsen af disse analysemetoder er at bestemme randbetingelserne i det grundvandsreservoir, der skal undersøges, hvilket naturligvis er en forudsætning for at kunne anvende de rigtige formler.

Et reservoirs type og randbetingelser kan bestemmes på basis af de geologiske, geofysiske og hydrogeologiske forhold samt ud fra sænkningens forløb under en prøvepumpning.

Fordelen ved disse metoder, i forhold til metoder som kræver stationære strømningebetingelser, er, at de udover at muliggøre beregning af transmissivitet også kan anvendes til beregning af grundvandsreservoirets magasinkoefficient. Desuden indgår tiden i ligningen for sænkningen, hvorved denne kan beregnes for en vilkårlig pumpeperiode med en konstant vandmængde.

Da alle data fra prøvepumpningens start til dens ophør er anvendelige for bestemmelse af de hydrauliske egenskaber, kan pumpningen almindeligvis standses, inden stationære strømningforhold er nået, hvorved pumpeperioden bliver kortere.

LITTERATUR

- ANDERSEN, L. J., 1965. Korttidsvariationer i grundvandstanden i relation til jordskælv og barometerstand. – »Vandteknik«. Årgang 33, juni 1965, pp. 38–42, august 1965, pp. 53–55. – København.
- ANDERSEN, L. J. og Z. HAMAN, 1970. Pumping test and hydrogeological investigations of an artesian aquifer near Horsens, Denmark. – *Nordic Hydrology* v. I, No. 2. – København.
- BENTALL, R., 1963. Shortcuts and special problems in aquifer tests. – U.S. Geol. Survey Water-Supply Paper 1545 – C. Washington.
- BOULTON, N. S., 1954. Unsteady radial flow to a pumped well allowing for delayed yield from storage. – *International Assoc. Sci. Hydrology. General Assembly of Rome*, v. 2, publ. 37.
- BROWN, R. H. m. fl., 1963. Methods of determining permeability, transmissibility and drawdown. – U.S. Geol. Survey Water-Supply Paper 1536 – I. – Washington.
- BRUIN, J. og H. I. HUDSON, JR., 1955. Selected methods for pumping test analysis. – *Illinois State Water Survey Rept. of Invest.* 25. – Urbana.
- CASTANY, G., 1962. Méthodes d'études et de recherches des nappes aquifères. – Bureau de Recherches Géologiques et Minières. No. d'imprimeur: 6482. – Paris.
- CHOW, V. T., 1966. *Handbook of applied Hydrology*. McGraw-Hill Book Co. – New York.
- COOPER, H. H., JR. og C. E. JACOB, 1946. A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well-field history. – *Trans. Am. Geophys. Union* v. 27 (4). – Washington.
- DAVIS, S. N., og R. J. M. DE WIEST, 1966. *Hydrogeology*. – John Wiley & Sons, Inc. – New York.
- FERRIS, J. G. m. fl., 1962. Theory of aquifer tests. – U.S. Geol. Survey Water-Supply Paper 1536 – E. – Washington.
- GLENSVIG, L., 1967. Dimensionering af gruskastningsborniger. – »Vandteknik«. Årgang 35, dec. 1967. – København.
- HAMAN, Z., 1964. Odabrane metode za analizu podataka dobivenih probnim crpljenjem bunara (Selected methods for pumping test analysis). – *Technological University of Zagreb. Degree Exam.* 234/63.
- HAMAN, Z. og L. J. ANDERSEN, 1969. Rapport over vandindvindingsmulighederne i området ved Kejlstrupvej, Silkeborg kommune. – *Danmarks Geologiske Undersøgelse*. København, dec. 1969. (Upubliceret).
- HAMAN, Z. og L. J. ANDERSEN, 1970. A contribution to the analysis of recovery data for the determination of the hydraulic properties of an aquifer. – *Danmarks Geologiske Undersøgelser Skrifter*, III. række, nr. 37. – København.
- HANTUSH, M. S., 1956. Analysis of data from pumping tests in leaky aquifers. – *Trans. Am. Geophys. Union*, 37 (6). – Washington.
- HANTUSH, M. S., 1960. Modification of the theory of leaky aquifers. – *Jour. Geophys. Res.* v. 65 (11). – Richmond.
- HANTUSH, M. S., 1961. Aquifer tests on partially penetrating wells. – *Proc. Am. Soc. Civil Engrs.* v. 87. Hy 5, Sept. – New York.

- HANTUSH, M. S., 1964. Hydraulics of wells. – *Advances in Hydrosience* v. 1 pp. 282–430. Academic Press. – New York.
- HANTUSH, M. S. og C. E. JACOB, 1955. Non-steady radial flow in an infinite leaky aquifer. *Trans. Am. Geophys. Union* v. 36 (1). – Washington.
- JACOB, C. E., 1944. Notes on determining permeability by pumping tests under water-table conditions. – U.S. Geol. Survey mimeo. rept. – Washington.
- JACOB, C. E., 1945. Partial penetration of pumping well, adjustments for. – U.S. Geol. Survey Water Resources Bull. Aug. – Washington.
- JACOB, C. E., 1946. Radial flow in a leaky artesian aquifer. – *Trans. Am. Geophys. Union* v. 27 (2). – Washington.
- JACOB, C. E., 1946. Drawdown test to determine effective radius of artesian well. – *Proc. Am. Soc. Civil Engrs.* v. 72 (5). – New York.
- JACOB, C. E., 1963. Recovery method for determining coefficient of transmissibility. – U.S. Geol. Survey Water-Supply Paper 1536-I. – Washington.
- LENNOX, D. H., 1966. Analysis and application of stepdrawdown test. – *Proc. Am. Soc. Civil Engrs.* v. 92. No. Hy 6. Nov. 1966. – New York.
- MOGG, J. L., 1969. Step-drawdown test needs critical review. – *Ground Water*, v. 7. No. 1. Jan.-Feb., 1969. – Urbana.
- PRICKETT, T. A., 1965. Type curve solution to aquifer tests under water-table conditions. – *Ground Water*, v. 3. No. 3. July 1965. – Urbana.
- RORABAUGH, M. I., 1953. Graphical and theoretical analysis of step-drawdown test of artesian well. – *Proc. Am. Soc. Civil Engrs.*, v. 79, Separate No. 362. – New York.
- THEIS, C. V., 1935. The relation between the lowering of piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground water storage. – *Trans. Am. Geophys. Union* 1935, pp. 519–524. – Washington.
- TODD, D. K., 1959. *Ground-water hydrology*. – John Wiley & Sons. – New York.
- WALTON, W. C., 1959. Efficiency of wells. – Illinois State Water Survey, mimeo. rept. – Urbana.
- WALTON, W. C., 1962. Selected analytical methods for well and aquifer evaluation. – Illinois State Water Survey, Bull. 49. – Urbana.
- WENZEL, L. K., 1942. Methods of determining permeability of water-bearing materials, with special reference to discharging-well methods. – U.S. Geol. Survey Water-Supply Paper 887. – Washington.