



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

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



Rapport

R42:1984

BRUNNAR

Undersökning — Dimensionering —
Borrning — Drift

Anna-Carin Andersson

Olof Andersson

Gunnar Gustafson

R
ANT

INSTITUTET FÖR BYGGDOKUMENTATION

Accnr

Plac *ser*

BYGGDOK

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

Byggforskningsrådet

R42:1984

BRUNNAR

Undersökning - Dimensionering - Borrning - Drift

Anna-Carin Andersson
Olof Andersson
Gunnar Gustafson

Denna rapport hänföer sig till forskningsanslag 780436-5
från Statens råd för byggnadsforskning till Chalmers
Tekniska Högskola, VA-Teknik, Göteborg.

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

R42:1984

ISBN 91-540-4108-2
Statens råd för bygnadsforskning, Stockholm

INNEHÅLLSFÖRTECKNING		<u>Sid</u>
1	FÖRORD	1.1
2	PROBLEMSTÄLLNING	2.1
3	TERMINOLOGI	3.1
	3.1 Schaktbrunnar	3.1
	3.2 Bergborrade brunnar	3.2
	3.3 Rörbrunnar	3.3
	3.4 Spetsrörbrunnar	3.4
4	BRUNNSHYDRAULIK	4.1
	4.1 Grundläggande hydrauliska begrepp	4.1
	4.1.1 Darcys lag	4.1
	4.1.2 Transmissivitet	4.2
	4.1.3 Magasinskoefficient	4.3
	4.1.4 Olika typer av grundvattenmagasin	4.3
	4.2 Brunnsekvationer	4.4
	4.2.1 Radiellt grundvattenflöde	4.4
	4.2.2 Thiems brunnsekvation	4.5
	4.2.3 Stationär avsänkning i ett öppet grundvattenmagasin	4.5
	4.2.4 Theis' brunnsekvation	4.7
	4.2.5 Dimensionslösa parametrar	4.9
	4.2.6 Utvärdering av hydrauliska parametrar	4.10
	4.2.7 Grundvattenmagasinets randvillkor	4.14
	4.3 Avsänkning i en uttagsbrunn	4.15
	4.3.1 Inverkan av igensättningar	4.16
	4.3.2 Inverkan av rensumpning och sprickighet	4.17
	4.3.3 Ofullständiga brunnar	4.18
	4.3.4 Turbulenta förluster	4.19
	4.3.5 Inverkan av vattenvolymen i brunnen	4.20
	4.3.6 Utvärdering av transmissivitet och skinfaktor	4.22
	4.3.7 Brunnens effektivitet	4.24
	4.3.8 Sammanfattande formler	4.26

5	VATTENKVALITET OCH KORROSION	5.1
5.1	Grundvattnets sammansättning	5.1
5.1.1	Nederbördens saltinnehåll	5.1
5.1.2	Grundvattenbildningsprocessen	5.2
5.1.3	Kemiska och biologiska processer i mark- zonen	5.4
5.1.4	Kemiska processer i grundvattenzonen	5.5
5.2	Vattenanalyser	5.5
5.2.1	Kvalitetskrav	5.5
5.3	Korrosion och igensättningar	5.6
5.3.1	Allmänt om korrosion	5.7
5.3.2	Korrosionens inverkan på ett brunnsfilter	5.11
5.3.3	Allmänt om igensättning	5.12
5.3.4	Vattenkvalitet	5.13
5.3.4.1	Korrosion	5.13
5.3.4.2	Igensättning	5.24
5.4	Igensättning av infiltrationsbrunnar	5.30
6	BORRNING OCH PROVTAGNING	6.1
6.1	Allmän bakgrund	6.1
6.2	Klassificering av bormetoder	6.2
6.3	Beskrivning av de vanligaste bormetoderna	6.7
6.3.1	Linstötborrning	6.8
6.3.2	Rotationsborrning med direktspolning	6.15
6.3.3	Rotationsborrning med omvänd spolning	6.32
6.3.4	Hammarborrning	6.35
6.3.5	OD- och ODEX-borrning	6.42
6.3.6	Enkel rördrivning	6.47
6.4	Provtagning och annan registrering vid under- sökningbörning	6.51
6.4.1	Bakgrund	6.51
6.4.2	Konventionell protokollföring	6.53
6.4.3	Provtagning	6.55
6.4.3.1	Provtagning vid linstötborrning	6.55
6.4.3.2	Provtagning vid rotationsbörning med spolning	6.57

6.4.3.3	Provtagning vid hammarborrning. Rotations- borrning med luft/skumspolning	6.64
6.4.3.4	Provtagning vid rördrivning	6.68
6.4.4	Registrering av borrsjunkning	6.71
6.4.5	Registrering av spolförluster	6.75
6.4.6	Kontinuerlig produktionstest	6.79
6.5	Registrering efter borring	6.80
6.5.1	Diameterloggning	6.80
6.5.2	TV-granskning	6.81
6.5.3	Elektrisk loggning	6.82
6.5.4	Gammaloggning	6.83
6.5.5	Temperaturloggning	6.84
6.5.6	Kemisk loggning	6.86
6.5.7	Produktions- och kapacitetstester	6.87
7	TRANSMISSIVITETSBESTÄMNINGAR	7.1
7.1	Allmänt	7.1
7.2	Siktkurvor	7.2
7.3	Provtagning och provtagningsfel	7.5
7.4	Permeabilitetsformler	7.9
7.5	Transmissivitetsuppskattning från ofullständiga pumpningsdata	7.13
8	BRUNNSUTFORMNING	8.1
8.1	Filtret	8.1
8.1.1	Filtrets verkningssätt	8.2
8.1.2	Val av filtertyp	8.4
8.1.3	Dimensionering av grusfilter	8.5
8.1.4	Dimensionering av formationsfilter	8.7
8.1.5	Perforering i spetsrörbrunnar	8.8
8.2	Filtterröret	8.9
8.2.1	Olika typer av filtterrör	8.9
8.2.2	Filtterrörets hydrauliska egenskaper	8.10
8.2.3	Filtterrörets renspumpningsbarhet	8.12
8.2.4	Filtterrörets hållfasthet	8.13
8.3	Brunnar i olika formationer	8.14
8.3.1	Grusfilterbrunn i grovsediment	8.14

8.3.2	Formationsfilterbrunn	8.15
8.3.3	Formationsfilterbrunn med förlorat filter	8.15
8.3.4	Olika konstruktionsdetaljer	8.16
8.3.5	Brunnar i sedimentära bergarter	8.17
8.4	Dimensioneringsgång	8.19
8.4.1	Dimensionerande mängder och avsänkningar	8.19
8.4.2	Brunnsdiameter och filtertyp	8.22
8.4.3	Filterrörets längd och slitsvidd	8.24
8.4.4	Kontroll av inflödes hastighet i filter och filterrör	8.24
8.4.5	Kontroll av avsänkningen	8.25
8.4.6	Materialval och hållfasthet	8.27
8.4.7	Borrningsföreskrifter och brunnsritning	8.27
9	BRUNNSBYGGNAD	9.1
9.1	Borring	9.1
9.2	Sättning av filter och filterrör	9.2
9.2.1	Allmänt	9.2
9.2.2	Filterrör	9.2
9.2.3	Filterfyllning	9.6
9.3	Rensningsmetoder	9.9
9.3.1	Allmänt	9.9
9.3.2	Brunnar i jord	9.10
9.3.3	Bergsborrade brunnar	9.17
9.4	Desinfektion	9.18
9.5	Kapacitetstester	9.21
9.6	Byggnadsbeskrivning	9.25
9.7	Dokumentation	9.30
10	PUMPAR OCH INSTALLATIONER	10.1
10.1	Allmänt	10.1
10.2	Effekt, verkningsgrad, pumpkaraktäristika	10.2
10.3	Olika pumptyper	10.3
10.3.1	Allmänt	10.3
10.3.2	Centrifugalpump	10.3
10.3.3	Ejektorpump	10.5
10.3.4	Dimensionering	10.6

10.3.5	Parallelldrift	10.7
10.3.6	Reglering av varvtal	10.7
10.4	Installationer	10.8
10.4.1	Uttagsbrunnar	10.8
10.4.2	Infiltrationsbrunnar	10.11
11	SKÖTSEL OCH EKONOMI	11.1
11.1	Tillsyn och skötsel	11.1
11.2	Ekonomi	11.4
12	REFERENSER	12.1

BILAGOR

Bilaga 1 Begreppslista

1. FÖRORD

I samband med en kurs i Brunnsteknik på Chalmers Tekniska Högskola 1976 togs initiativ till att utforma en handbok om brunnar på svenska.

Materialet till denna bok utgörs av erfarenheter från främst svenska konsulter som arbetat med brunnar utgående från i huvudsak tyska och amerikanska erfarenheter.

Materialet har skrivits ned och redigerats med stöd av medel från Statens Råd för Byggnadsforskning. Projektet har genomförts på institutionen för vattenförsörjnings- och avloppsteknik samt institutionen för geologi på Chalmers Tekniska Högskola.

Hösten 1982 har ytterligare en kurs hållits på Chalmers Tekniska Högskola. Boken användes där som kurslitteratur varefter en redigering har utförts.

Det är vår förhoppning att boken skall vara till god hjälp vid utformning, byggande och drift av uttags- och infiltrationsbrunnar.

Göteborg mars 1983

Ann-Carin Andersson
Olof Andersson
Gunnar Gustafson

En brunn är ett grävt, sprängt eller borrarat hål nedfört till grundvattenförande lager i syfte att erhålla eller infiltrera vatten.

När man skall utforma en brunn måste ändamålet med brunnen vara helt klarlagt. Skall brunnen användas för att infiltrera eller utvinna vatten? Hur stor kapacitet önskas? Skall vattnet drickas eller skall det användas för annat ändamål som t ex bevattning eller kylning. Hur lång driftstid beräknas brunnen ha?

I huvudsak kan man skilja ut tre olika utföranden av brunnar.

- Rörbrunnar i jord
- Grävda brunnar
- Bergborrade brunnar i kristallint eller sedimentärt berg

Vilket av de tre utförandena som väljs beror på vilken kapacitet som önskas och på de lokala geologiska förhållandena.

För större uttag (kommunala brunnar) utnyttjas vanligtvis rörbrunnar i jord eller sedimentärt berg. Vid enskilda hushåll dvs för små kapaciteter kan det vara fullt tillräckligt med grävda brunnar eller brunnar borrade i kristallint berg.

Infiltrationsbrunnar utformas vanligtvis enligt samma principer som uttagsbrunnar. För infiltrationsbrunnar kan man skilja på olika ändamål som styr valet av placering relativt hårt. Om brunnen skall utnyttjas för att höja grundvattennivåer i slutna akviferer är placeringen naturligtvis bunden till den aktuella akviferen. Ofta kan man dock välja mellan att utföra brunnen som rörbrunn i den aktuella akviferen eller som bergborrade i angränsande berg. I öppna akviferer utnyttjas brunnar för att förstärka en vattentäkt eller för att infiltrera dagvatten. Infiltration i

öppna akviferer sker dock vanligtvis från bassänger eller perkolationsmagasin.

Utförandet av rörbrunnar i jord är mer omfattande än de övriga två typerna varför mest utrymme kommer att ges åt problematiken runt dessa i den fortsatta texten.

Generellt kan sägas att utformning av brunnar till största delen beror av den formation som den skall stå i, dvs dess egenskaper som permeabilitet, kornstorleksfördelning, mäktighet och vattenkvalitet. Om driftstiden är begränsad kan ofta ett förenklat förfarande tillämpas.

I det följande redovisas de faktorer som bör beaktas vid utförande av en brunn, dessa är:

- Undersökningsborrning och provtagning för att bestämma läge för brunnen samt formationens vatten-transporterande egenskaper
- Kontroll av vattenkvalitet och risk för korrosion och igensättning
- Dimensionering av brunnen
- Byggandet av brunnen
- Val av pump och andra installationer
- Drift och skötsel av brunnen
- Ekonomi

För att öka förståelsen för resonemang och slutsatser som förs i boken diskuteras i inledningskapitlet terminologi och grundläggande teoretiska betraktelser som senare utnyttjas.

3 TERMINOLOGI

En brunn kan definieras som ett borrarat eller grävt hål i jord eller berg för att utvinna eller injektera vatten eller något annat medium. Brunnen kan utformas på olika sätt, som i huvudsak bestäms av de geologiska förhållandena och av hur mycket vatten man önskar utvinna. Följande kapitel redovisar några olika brunnstyper och definierar olika brunnstekniska begrepp. I bilaga 1 ges en lista på använda symboler och enheter.

3.1 Schaktbrunnar

En vanlig brunnstyp för små vattenuttag i jordlager är schaktbrunnen. Brunnen är uppbyggd av ett brunnsschakt och den mot formationen öppna arean finns i botten på brunnen, se figur 3.1.

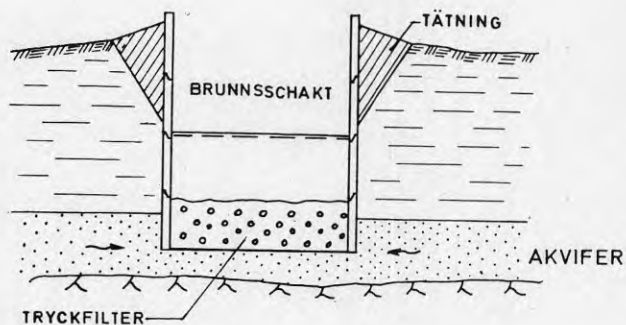


Fig 3.1 Schaktbrunn.

Brunnschaktet utföres vanligen av betongringar, som sänkes genom invändig grävning. Konstruktioner med platsgjuten betong (sänkbrunn) och grävning inom spont förekommer även.

De formationer som i första hand är lämpliga för schaktbrunnar är morän och grovkorniga isälvsediment. Vatteninflödet sker genom den öppna bottenarean, som tillåter inflytning av material genom sättningar utanför brunnen som följd. För att hindra inflytning lägges ofta ett tryckfilter av grus i botten på brunnen.

Som brunn betraktat är schaktbrunnen inte speciellt effektiv, då intagsytan är vinkelrät mot flödesriktningen i akviferen. Vid små intermittenta uttag kan den dock ha fördelar, då den stora brunnsvolymen fungerar som lågreservoar.

3.2 Bergborrade brunnar

Den vanligaste brunnen i Sveriges idag är bergbrunnen eller den bergborrade brunnen, som borraras med en öppen del i fast berg, se figur 3.2.

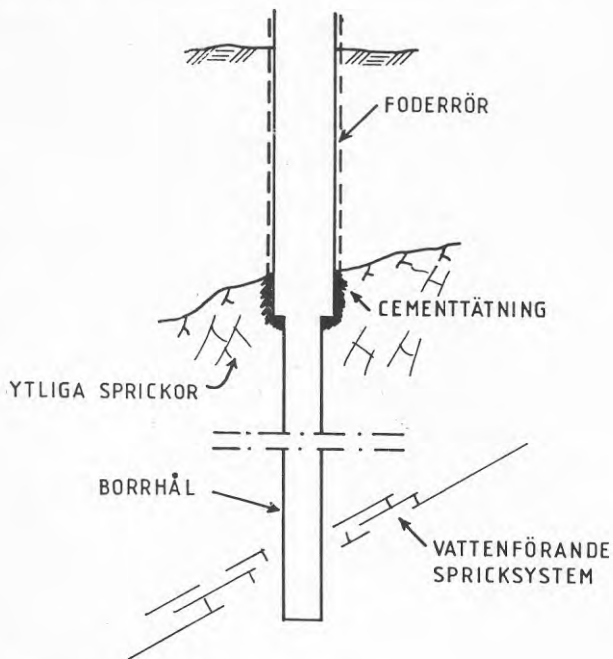


Fig 3.2 Bergbrunn.

Den bergborrade brunnen utföres med borrning från berggrundsytan, sedan jordlagren penetrerats med ett borrör eller arbetsrör. I borröret och i den översta delen av berget nedsättes ett foderrör, som normalt gjutes fast med cement. Gjutningen medför också en tätning av ytliga sprickor och slag. Vid vissa bormetoder användes borröret som foderrör och lämnas kvar. Den öppna delen under foderröret utgör själva borrhålet.

Årligen utföres ca 10 000 bergsbrunnar i Sverige. Brunnstypen ger oftast små vattenmängder upp till ca 1 l/s.

3.3 Rörbrunnar

Brunnar med horisontell inströmning benämnes rörbrunnar. Brunnsröret indelas vanligen i filterrör, där inflödet till brunnen sker, förlängningsrör upp till markytan och sumprör under filterröret i det fall detta förekommer. För att förmedla jordtrycket mellan akvifer och filterrör och för att förhindra material från formationen att vandra in i brunnen omges brunnsröret av ett filter. Detta kan antingen genom rensumpning utvecklas direkt ur akviferen, formationsfilter, eller placeras på plats under borrhålets arbetena, grusfilter. Se figur 3.3.

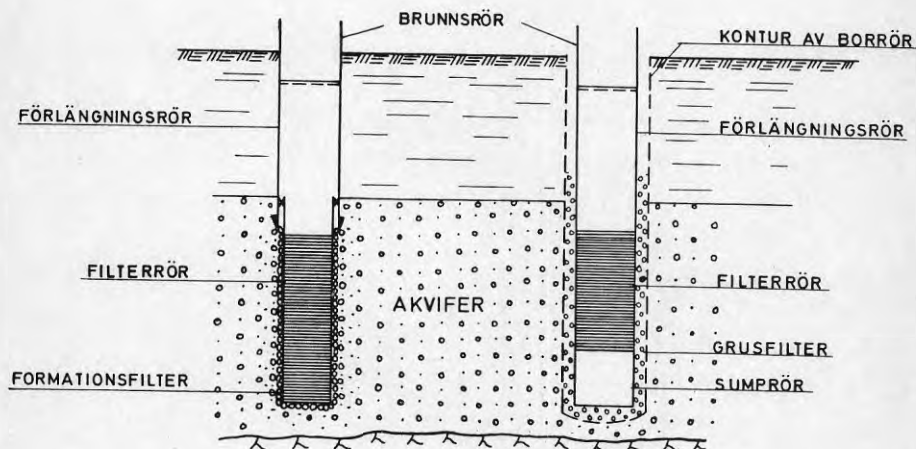


Fig 3.3 Rörbrunnar.

Det horisontella inflödet till en rörbrunn medger ett effektivt utnyttjande av akviferen, speciellt om filtterröret täcker hela den vattenförande delen. Brunnen säges då vara fullständig. En ofullständig brunn täcker endast en del av formationen och på grund av att flödet närmast brunnen inte blir horisontellt får denna lägre effektivitet, se figur 3.4.

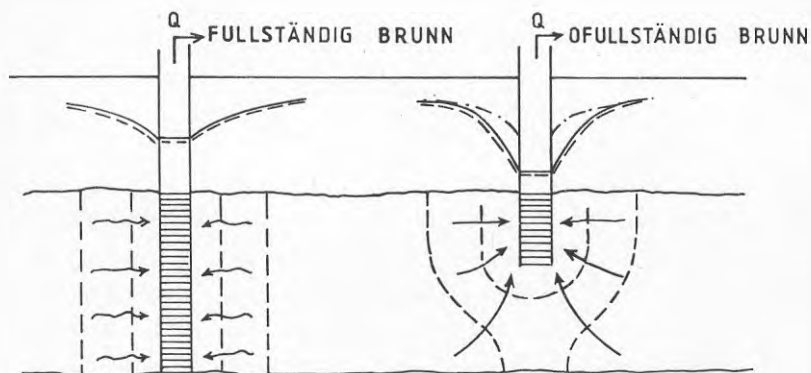
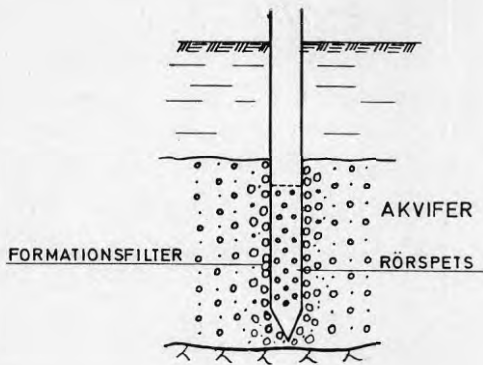


Fig 3.4 Flödesförhållanden kring rörbrunnar.

Rörbrunnar lämpar sig för formationer med hög permeabilitet, som våra isälvsavlagringar och mer eller mindre konsoliderade, porösa sedimentbergarter. Genom att filtret kan anpassas direkt till formationen kan gynnsamma inflödesförhållanden erhållas. För stora vattenuttag har därför rörbrunnar en dominerande ställning och i stort sett all modern brunnsteknik grundar sig på rörbrunnstekniken.

3.4 Spetsrörbrunnar

En enklare typ av rörbrunn är spetsrörbrunnen, som drives ned. Brunnsröret är här perforerat och ett formationsfilter utvecklas genom rensumpning, se figur 3.5.



Figur 3.5 Spetsrörbrunn.

Spetsrörbrunnar har sin viktigaste användning för tillfälliga grundvattenuttag, som vid provpumpningar eller grundvattensänkningar vid byggande. I det senare fallet spolas spetsarna ofta ned, well point. För permanenta uttag användes den endast vid små vattenbehov.

En brunn utformas för att ge en önskad vattenmängd under en lång tidsperiod. För att resultatet skall bli det önskade fordras dels en omsorgsfull tillämpning av de hydrauliska principer som styr utformningen, dels att brunnen byggs med skicklighet och noggrannhet. Både den som konstruerar och bygger brunnen måste känna till de grundläggande brunnshydrauliska principerna. Följande kapitel är en kort redogörelse för hur en brunn fungerar i sin geologiska omgivning och hur brunnens egenskaper påverkar avsänkning och uttagsmöjligheter.

4.1 Grundläggande hydrauliska begrepp

4.1.1 Darcys lag

På grundval av experiment med sandfilter fann den franske ingenjören Darcy (1856) att flödet genom ett porsystem är proportionellt mot tryckfallet dividerat med flödessträckan.

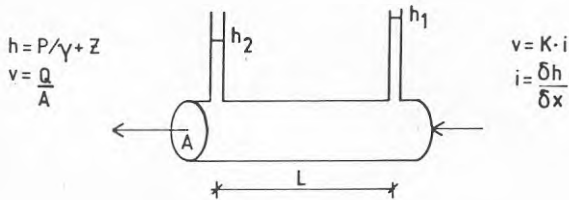


Fig 4.1 Darcys lag.

Proportionalitetskonstanten, K , kallas permeabilitet eller hydraulisk konduktivitet och har dimensionen hastighet (längd/tid). Permeabiliteten beror av det porösa mediets och vätskans egenskaper. En dimensionsanalys ger följande formel:

$$K = C D^2 \cdot \frac{\gamma}{\mu} \quad (4.1)$$

I ovanstående formel är C en dimensionslös konstant som beror på porernas form och orientering och d är ett karakteristiskt mått för porerna eller de korn, som bygger upp porsystemet. Produkten, $Cd^2 = k$, kallas specifik permeabilitet och är beroende av vätskans egenskaper. $\frac{\gamma}{\mu}$, är kvoten mellan vätskans tunghet och viskositet. Denna är för vatten temperaturberoende men då vattentemperaturen normalt är konstant i ett grundvattenmagasin kan permeabiliteten ses som en materialkonstant. Som standardtemperatur vid permeabilitetsbestämningar väljes normalt 10°C .

4.1.2 Transmissivitet T (m^2/s)

En brunnns kapacitet bestäms inte av permeabiliteten i de enskilda skikten utan av hela lagerföljdens genomsläpplighet. Ett mått på den kan man få genom att summera permeabiliteten för de ingående skikten (se fig 4.2).

$$T = \int_0^b K(z) dz \quad (4.2)$$

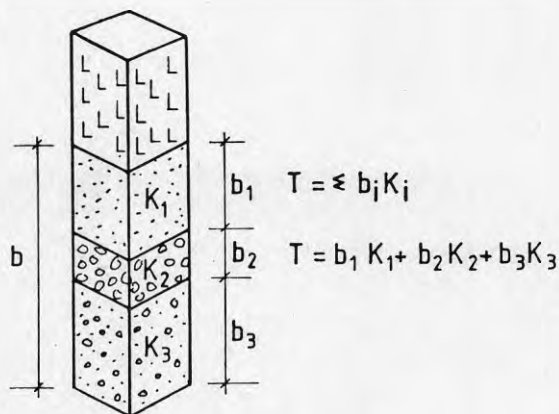


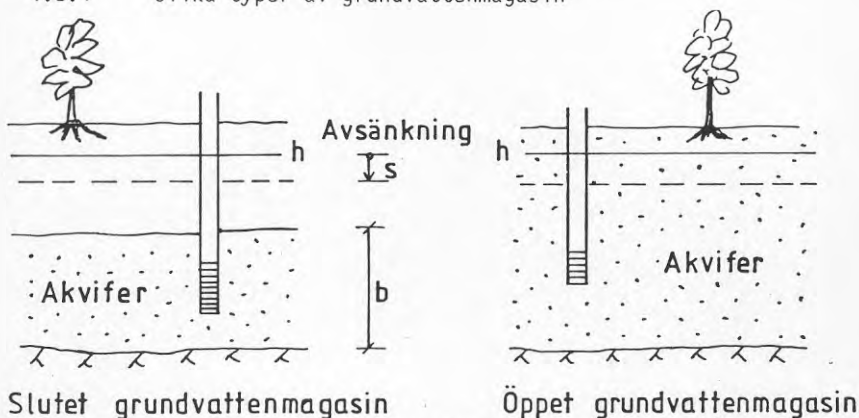
Fig 4.2 Transmissivitet.

Med denna definition följer att transmissiviteten är den vattenmängd, som flödar genom ett 1 m bred prisma av grundvattenmagasinet vid gradienten 1 m/m.

4.1.3 Magasinskoefficienten, S ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{m}$)

Magasinskoefficienten definieras som den vattenvolym som ett grundvattenmagasin kan avge eller lagra per ytenhet vid en enhets förändring av grundvattennivån.

4.1.4 Olika typer av grundvattenmagasin



Slutet grundvattenmagasin Öppet grundvattenmagasin

Fig 4.3 Olika typer av grundvattenmagasin.

Vid en avsänkning av grundvattennivån avges en mängd vatten från porsystemet. I ett slutet magasin medför trycksänkningen huvudsakligen att akviferen komprimeras genom att lasten på kornskelettet från överliggande lager ökar. Detta innebär att endast små mängder vatten kan avges eller lagras per ytenhet.

I ett öppet magasin dräneras akviferens porsystem vid en avsänkning och den avgivna vattenmängden motsvarar materialets vattenavgivningstal. Detta medför att relativt stora vattenmängder avges vid en avsänkning.

4.2 Brunnsekvationer

4.2.1 Radiellt grundvattenflöde

När en brunn pumpas kommer grundvattennivån kring och i brunnen att avsänkas. Avsänkningen, s , är störst i brunnen och på tillräckligt avstånd, R_0 , kan ingen avsänkning märkas. Då avsänkningen är störst i brunnen kommer enligt Darcys lag vatten att flöda mot denna. Vid stationära förhållanden kommer flödet mot brunnen genom en tänkt cylinder kring denna alltid att vara lika med den uppumpade vattenmängden, se fig 4.4.

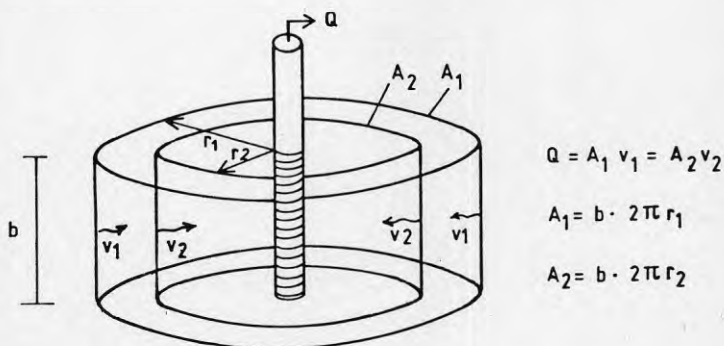


Fig 4.4 Radiellt flöde kring en brunn.

Av Darcys lag följer då att gradienten är omvänt proportionell mot radien:

$$K \cdot i_1 = \frac{Q}{A_1} = \frac{Q}{b \cdot 2\pi r_1} \quad \text{eller} \quad i = \frac{dh}{dr} = \frac{Q}{Kb \cdot 2\pi r_1} = \frac{Q}{2\pi T r_1} \quad (4.3)$$

Således blir avsänkningstratten brantare ju närmare brunnen man kommer, och ju lägre transmissiviteten är desto brantare blir avsänkningstratten. Dvs en låg transmissivitet ger stor avsänkning.

4.2.2 Thiems brunnsekvation

För att beräkna avsänkningen i ett homogent slutet grundvattenmagasin kan ekvation (4.3) utnyttjas

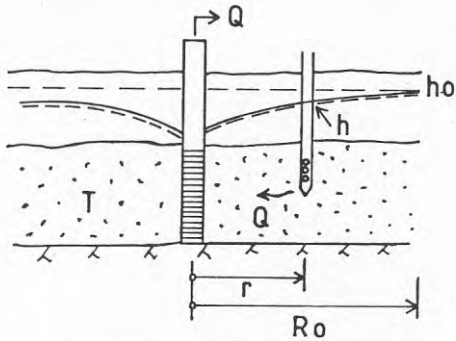


Fig 4.5 Härledning av Thiems brunnsekvation.

Enligt ekvation 4.3 gäller:

$$\frac{dh}{dr} = \frac{Q}{2\pi T r} \quad \text{eller} \quad dh = \frac{Q}{2\pi T} \cdot \frac{dr}{r} \quad (4.4a)$$

$$h = \frac{Q}{2\pi T} \ln r + C \quad (4.4b)$$

Men $h = h_0$ för $r = R_0$:

$$s = h_0 - h = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{R_0}{r} \quad (4.4c)$$

4.2.3 Stationär sänkning i ett öppet grundvattenmagasin

I ett öppet grundvattenmagasin utnyttjas akviferen ända upp till grundvattennivån. Detta medför att transmissiviteten minskar när

nivån sänks. Detta fall kan lösas om permeabiliteten är likformigt fördelad över akviferen, dvs $T_0 = K \cdot h_0$. Vidare antages att flödet är horisontellt, (Dupuits antagande) vilket inte helt stämmer intill brunnen.

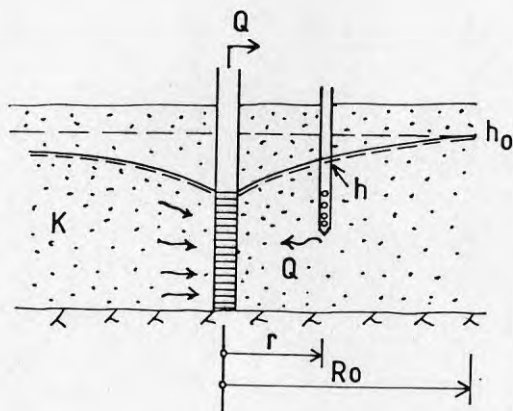


Fig 4.6 Avsänkning i ett öppet grundvattenmagasin.

I detta fall gäller:

$$\frac{dh}{dr} = \frac{Q}{2\pi K h \cdot r} \text{ eller } h \cdot dh = \frac{Q}{2\pi K} \cdot \frac{dr}{r} \quad (4.5a)$$

$$\frac{h^2}{2} = \frac{Q}{2\pi K} \ln r + C \quad (4.5b)$$

Men $h = h_0$ för $r = R_0$

$$h_0^2 - h^2 = \frac{Q}{\pi K} \ln \frac{R_0}{r} \quad (4.5c)$$

Då $T_0 = K \cdot h_0$ kan man visa att denna ekvation asymptotiskt närmar sig Thiems brunnsekvation.

$$s = h_0 - h = \frac{Q}{(h_0 + h)\pi K} \ln \frac{R_0}{r} \rightarrow \frac{Q}{2\pi T_0} \cdot \ln \frac{R_0}{r} \quad (4.6)$$

Om ekvationen serieutvecklas erhålls:

$$s = \frac{Q}{2\pi T_0} \ln \frac{R_0}{r} + \frac{(\ln R_0/r)^2}{8 h_0 \pi^2 T_0^2} \cdot Q^2 + \dots \quad (4.7)$$

4.2.4 Theis' brunnsekvation

Under icke stationära förhållanden, måste tömningen av grundvattemagasinet tas med i flödesekvationen, se fig 4.7.

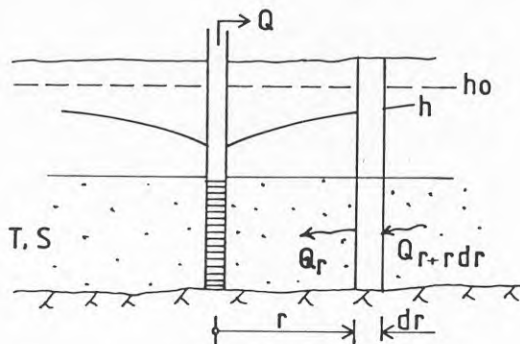


Fig 4.7 Theis' brunnsekvation

Följande ekvationer kan ställas upp:

$$Q_r = \frac{\partial h}{\partial r} \cdot r \cdot 2\pi T \quad (4.8a)$$

$$Q_{r+dr} = \left(\frac{\partial h}{\partial r} + \frac{\partial^2 h}{\partial r^2} dr \right) (r + dr) 2\pi T \quad (4.8b)$$

samt magasinströmningen per tidsenhet:

$$Q_S = 2\pi r \, dr \cdot S \cdot \frac{\partial h}{\partial t} \quad (4.8c)$$

Efter hyfsning erhålles:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial h}{\partial r} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (4.8d)$$

Randvillkor:

$$\lim_{r \rightarrow 0} (r \cdot \frac{\partial h}{\partial r}) = \frac{Q}{2\pi T} \quad \text{flödet konstant i brunnen} \quad (4.8e)$$

$$\lim_{r \rightarrow \infty} h = h_0 \quad \text{ingen avsänkning på oändligt avstånd} \quad (4.8f)$$

$$h(r, t \leq 0) = h_0 \quad \text{ingen avsänkning före pumpstart} \quad (4.8g)$$

Lösningen till ekvationssystemet kan ställas upp på följande vis (Theis):

$$s = h_0 - h = \frac{Q}{4\pi T} \int_u^\infty \frac{e^{-x}}{x} dx = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \quad (4.9a)$$

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt} \quad (4.9b)$$

$W(u)$ benämnes oftast Theis' brunnsfunktion och finns tabellerad i bilaga 2. u är en dimensionslös hjälpvariabel där brunnsradie, magasincoeffcient, transmissivitet och pumpningstid ingår.

Theis' brunnsekvation kan serieutvecklas med avseende på u :

$$W(u) = -0,5772 - \ln u + u - \frac{u^2}{2 \cdot 2!} + \frac{u^3}{3 \cdot 3!} - \dots \quad (4.10)$$

4.2.5 Dimensionslösa parametrar

För att underlätta utvärderingen av mätdata kan brunnsekvationerna omformuleras. Detta sker genom att ekvationerna och de ingående parametrarna skrives i dimensionslös form. De dimensionslösa parametrarna väljes så att de är proportionella mot de fysiska parametrarna.

Inledningsvis definieras följande:

$$\sigma = \frac{s \cdot 2\pi T}{Q} \quad \text{dimensionslös avsänkning} \quad (4.12)$$

$$\rho = \frac{r}{r_w} \quad \text{dimensionslös radie} \quad (4.13)$$

$$\theta = \frac{Tt}{r^2 S} = \frac{1}{4u} \quad \text{dimensionslös tid} \quad (4.14)$$

Omformuleringen medför att Thiems och Theis brunnsekvationer kan skrivas på följande sätt:

$$\sigma = \ln \rho \quad \text{Thiem} \quad (4.15)$$

$$\sigma = \frac{W(1/4\theta)}{2} \quad \text{Theis} \quad (4.16)$$

4.2.6 Utvärdering av hydrauliska parametrar

Som ekvationerna visar medger de dimensionslösa parametrarna ett komprimerat skrivsätt, men dessutom gäller att den dimensionslösa avsänkning endast beror av en parameter, den dimensionslösa influensradien respektive dimensionslösa tiden, se fig 4.8.

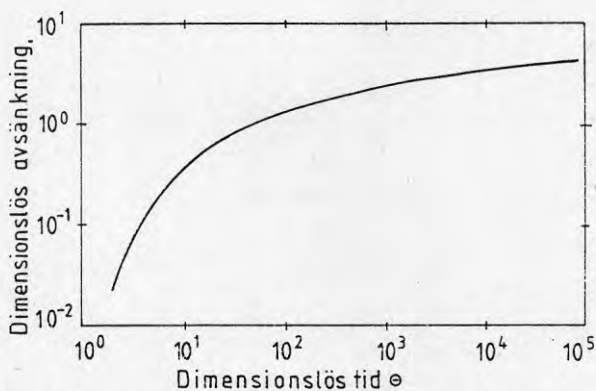


Fig 4.8 Dimensionslös avsänkning, Theis.

För ett homogent, isotropt grundvattenmagasin kommer således den dimensionslösa avsänkning alltid att beskriva samma funktion. Om grundekvationerna logaritmeras, erhålles följande samband:

$$\log \sigma = \log s + \log \frac{2\pi T}{Q} \quad (4.17a)$$

$$\log \theta = \log t + \log \frac{T}{r^2 S} \quad (4.17b)$$

Då $\log \sigma$ förhåller sig till $\log \theta$ som $\log s$ till $\log t$ och övriga termer är konstanta under pumpningen, kan magasinparametrarna T och S bestämmas genom kurvpassning i logaritmiska diagram. I diagrammen väljes en matchpunkt och funktionsparametrarna avläses, se fig 4.9.

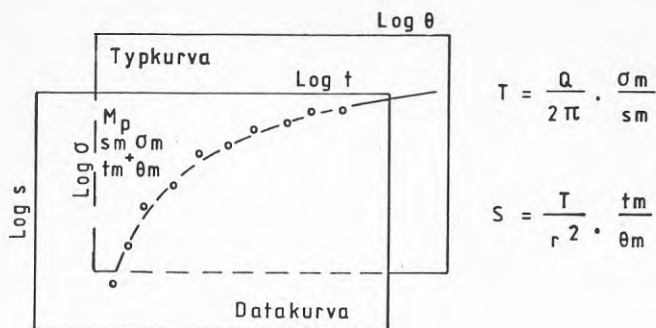


Fig 4.9 Parameterbestämning genom kurvpassning.

Med de i figuren givna formlerna kan T och S beräknas.

Från ekvationen 4.10 finner man att Theis' brunnsekvation kan serieutvecklas. Om hjälpparametern u blir tillräckligt liten, finner vi att funktionen kommer att asymptotiskt närma sig en rät linje i ett halvlogaritmiskt diagram.

$$s = \frac{Q}{4\pi T} (-\ln u - 0,5772), \quad u < 0,01 \quad \text{Cooper och Jacob} \quad (4.18a)$$

eller i dimensionslösa parametrar:

$$s = \frac{Q}{2\pi T} \cdot \sigma \quad (4.18b)$$

$$\sigma = 0,5(0,8091 + \ln \theta) \quad (4.18c)$$

$$\theta = \frac{Tt}{r^2 S} \quad (4.18d)$$

Av detta följer att transmissivitet och magasinskoefficient även kan bestämmas från en halvlogaritmisk datakurva, se fig 4.10. (Cooper och Jacob, 1946).

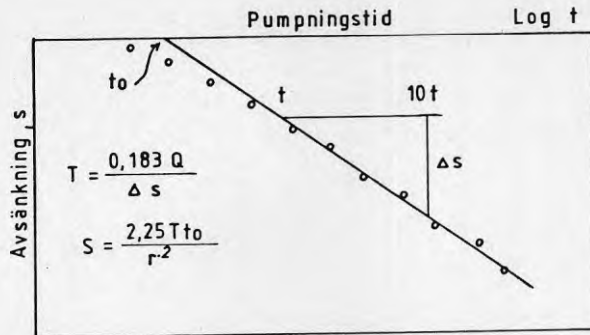


Fig 4.10 Utvärdering av pumpningsdata från halvlogaritmisk avbildning.

Om tiden mätes i minuter kan ekvation (4.18a) skrivas som:

$$s = 0,183 \frac{Q}{T} \log \frac{135 T t_{\min}}{r^2 S} \quad (4.19)$$

Vid tiden 10 t är avsänknigen:

$$s_{10} = 0,183 \frac{Q}{T} \log \frac{135 T \cdot 10 t_{\min}}{r^2 S} \quad (4.20a)$$

$$\Delta s = s_{10} - s = 0,183 \frac{Q}{T} \left(\log \frac{1350 T t_{\min}}{r^2 S} - \log \frac{135 T t_{\min}}{r^2 S} \right) \quad (4.20b)$$

eller

$$T = 0,183 \frac{Q}{\Delta s} \quad (4.20c)$$

Vid tiden t_0 är avsänknigen noll eller:

$$0 = \log \frac{135 T t_0}{r^2 S}, \text{ min} \quad (4.20d)$$

$$S = \frac{135Tt_{0, \min}}{r^2} \quad (4.20e)$$

Den senare ekvationen kan utnyttjas för att beräkna ett approximativt värde för influensradien vid varje tillfälle:

$$R_0 \approx \sqrt{\frac{135Tt_{\min}}{S}} \quad (4.21)$$

Om data från flera observationsrör på olika avstånd från uttagsbrunnen föreligger, kan dessa utnyttjas för att bestämma magasinparametrarna.

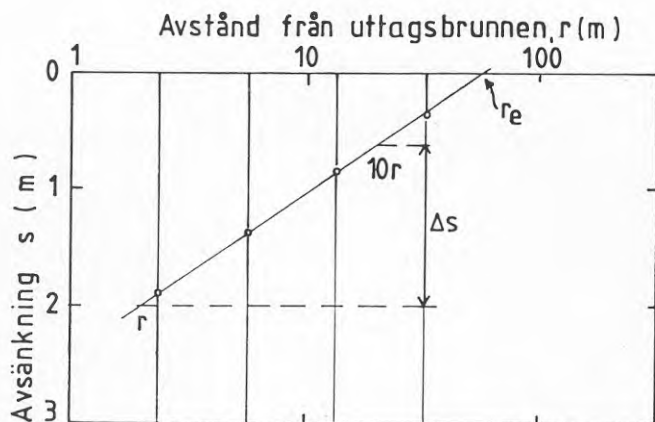


Fig 4.11 Avstånd - avsänkning, halvlogaritmisk avbildning.

Ekvation (4.13) ger:

$$\Delta s = s_r - s_{10r} = 0,183 \frac{Q}{T} \left(\log \frac{135Tt_{\min}}{r^2 S} - \log \frac{135Tt_{\min}}{100r^2 S} \right) = 0,366 \frac{Q}{T} \quad (4.22a)$$

$$T = \frac{0,366Q}{\Delta s} \quad (4.22b)$$

På avståndet r_e är avsänkningsnoll:

$$0 = \log \frac{135Tt_{\min}}{r_e^2 S} \quad (4.22c)$$

$$S = \frac{135Tt_{\min}}{r_e^2} \quad (4.22d)$$

4.2.7 Grundvattenmagasinets randvillkor

Thiems och Jacobs brunnsekvationer är härledda under förutsättning att grundvattenmagasinet är homogent och har oändlig utsträckning. Sådana förhållanden råder endast i stora sedimentära bäcken med homogena förhållanden. I kvartären i Sverige har de goda akvifererna normalt så begränsad utbredning att magasinets gränser påverkar avsänkningsnoll. Utvärderingen av gränsernas inverkan är ofta en komplicerad procedur och för en fullständig redogörelse hänvisas till speciallitteraturen (Ferris, 1962, Gustafson, 1978 m fl). För att utvärdera en brunns egenskaper kan emellertid en kvantitativ analys vara tillfyllest (Earlougher, 1977).

Dimensionslösa avsänkningsfunktioner finns för ett stort antal typfall och randvillkor beräknade i t ex Earlougher: *Advances in well test analysis* (1977).

När grundvattenmagasinets randvillkor påverkar avsänkningsnoll avviker sänkningskurvan från den räta linjen i ett Jacob-diagram. Om gränsen är tät hindras tillflödet och avsänkningshastigheten ökar. Å andra sidan kan formationen gränsa mot ytvatten eller lager från vilka ett läckage kan komma och ett jämviktstillstånd utbildas. En principiell bild visas i fig 4.12.

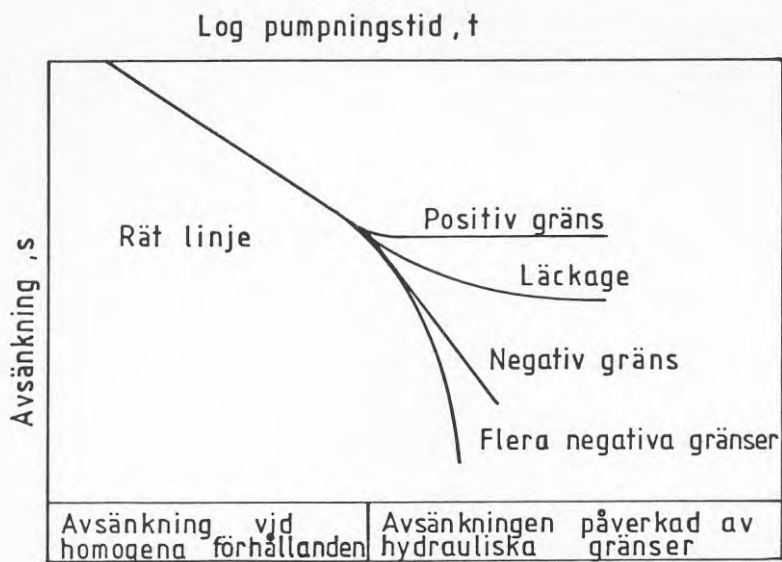


Fig 4.12 Avsänkingsförlopp vid olika randvillkor.

För att utvärdera grundvattenmagasinets egenskaper i och invid brunnen kan endast den del av avsänkingsförloppet, som inte är påverkat av randvillkoren utnyttjas. Det är därför viktigt att pumpning pågår så lång tid att tidpunkten när gränserna påverkar avsänkningens kan bestämmas. Vidare måste med hänsyn till det logaritmiska förloppet täta mätningar utföras under inlednings-skedet.

4.3 Avsänkning i en uttagsbrunn

De redovisade ekvationerna gäller med god approximation för avsänkning i observationsrör utanför uttagsbrunnen. Avsänkning i brunnen påverkas dessutom av dess egna hydrauliska egenskaper. Dessa beror dels på att en helt perfekt brunn ej går att åstadkomma, dels på att brunnen kan sättas igen med tiden.

4.3.1 Inverkan av igensättningar (Skinfaktor)

När brunnen byggs upp kommer normalt en omlagring av materialet vid borrhålsväggen, som medför en tätning av modermaterialet. Om borrningen sker med rotationsmetod kan dessutom borrhvatskan lägga sig som en tätande hud på borrhålsväggen, skin.

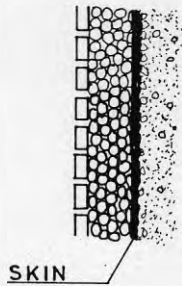


Fig 4.13 Igensättning av borrhålsväggen, skin.

Igensättningen har låg permeabilitet och medför ett stort tryckfall över en kort sträcka, men är konstant i tiden, se fig 4.14.

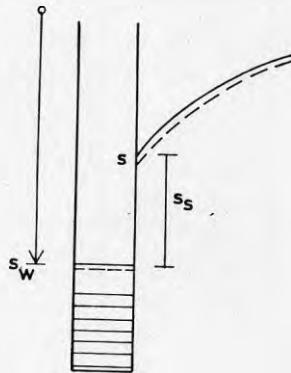


Fig 4.14 Skinfaktor.

Med dimensionslösa parametrar kan avsänkningen i brunnen beskrivas som:

$$s_w = \frac{Q}{2\pi T} (\sigma + \xi) \quad (4.23)$$

Skinfaktorn kan således beräknas som:

$$\xi = \frac{s_s \cdot 2\pi T}{Q} \quad \text{dimensionslös} \quad (4.24)$$

Av skinfaktorn definition följer dessutom att brunnens effektiva radie kan beräknas som:

$$r_{wf} = r_w \cdot e^{-\xi} \quad (4.25)$$

4.3.2 Inverkan av rensumpning och sprickighet, negativ skin

Om formationens permeabilitet kring brunnen höjs genom rensumpningen eller om brunnen står i en lokalt sprucken berggrund kan avsänkningen bli mindre än vad som motiveras av akviferens egenskaper i stort.

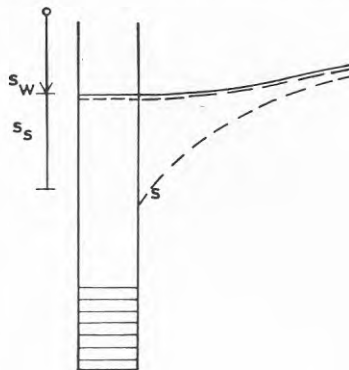


Fig 4.15 Negativ skinfaktor.

Problemet kan behandlas hydrauliskt på samma sätt som vid igen-sättningar och ekvation (4.22) gäller även i detta fall med den skillnaden att skinfaktorn, ξ , är negativ. Följaktligen kommer brunnens effektiva radie att bli större än den verkliga.

4.3.3 Ofullständiga brunnar

En brunn som inte utnyttjar hela akviferen säges vara ofullständig. Som en följd av detta kommer grundvattenflödet vid uttag att konvergera mot filtret, se fig 4.16.

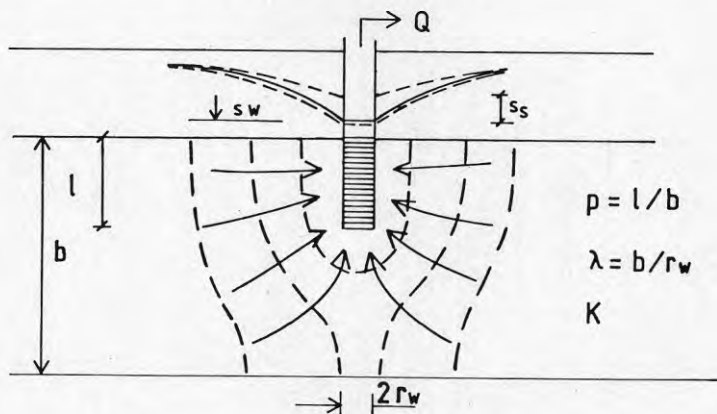


Fig 4.16 Flödet kring en ofullständig brunn.

Genom det konvergerande flödet kommer avsänkningen i en ofullständig brunn att bli större än i en fullständig. Skillnaden är proportionell mot uttaget och konstant i tiden. Det konvergerande flödet har således samma verkan som skineffekten och kan hydrauliskt behandlas på samma sätt. Med kännedom om akviferens och brunnens geometri kan en pseudoskinfaktor beräknas, se fig 4.17. Formeln är härledd för slutna grundvattenmagasin men gäller approximativt även för öppna. I detta fall sättes $b=h_0$ och l till avståndet från grundvattennivån till filtrets underkant.

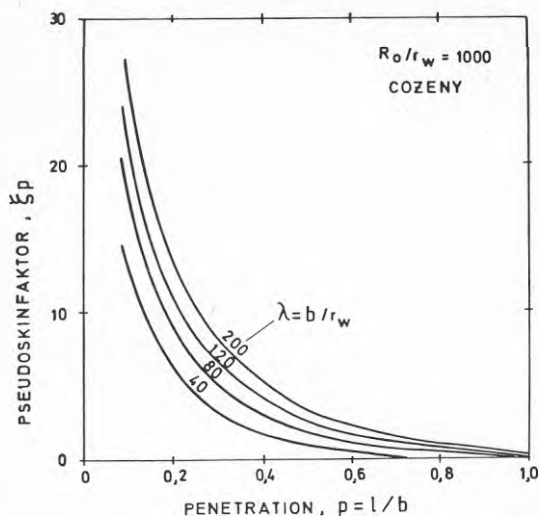


Fig 4.17 Pseudoskinfaktor för ofullständiga brunnar.

Avsänkningen i brunnen blir i detta fall:

$$s_w = \frac{Q}{2 \pi T} (\sigma + \xi_p) \quad (4.26)$$

4.3.4 Turbulenta förluster

I brunnar med liten fri inströmningsarea kan hastigheten i filterröret bli så hög att turbulent flöde uppkommer. Tilläggsavsänkningen över filterröret blir i detta fall proportionellt mot uttaget i kvadrat. För en korrekt dimensionerad brunn skall emellertid flödet genom filter och filterrör vara laminärt varför inverkan av turbulent flöde oftast kan bortses ifrån.

Emellertid uppkommer vid öppna grundvattenmagasin en avsänkningsterm som också beror på uttaget i kvadrat, se ekvation 4.7. Denna term har ofta en sådan storlek att den påverkar totalavsänkningen.

Vid stegprovpumpningar, se kapitel 9.5, där man pumpar brunnen i flera kapacitetssteg kan man ofta notera att en kvadratisk term

med avseende på uttaget påverkar avsänkningen. I de flesta fall orsakas den av att grundvattenmagasinet är öppet och att därmed den vattenförande mäktigheten minskar vid en avsänkning.

4.3.5 Inverkan av vattenvolymen i brunnen

Vid korta tider spelar brunnsrörets volym roll för avsänkingsförloppet. Vid pumpstart tas vattnet från brunnsröret och vid pumpstopp måste brunnsröret fyllas, se fig 4.18.

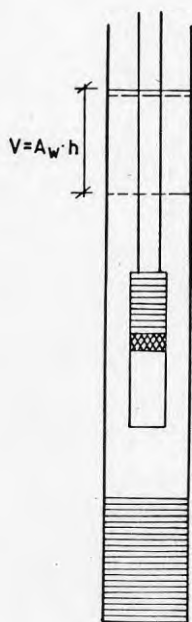


Fig 4.18 Definition av brunnsmagasin.

Brunnsmagasinet, A_w , är lika med brunns tvärsnittsarea minus stigarledningar och dylikt. Den dimensionslösa magasinetsfaktorn definieras som:

$$\gamma = \frac{A_w}{S \cdot 2\pi r_w} \quad (4.27)$$

Om data från inledningen av en pumpning uppritas i logaritmisk avbildning får datakurvan ett karakteristiskt utseende.

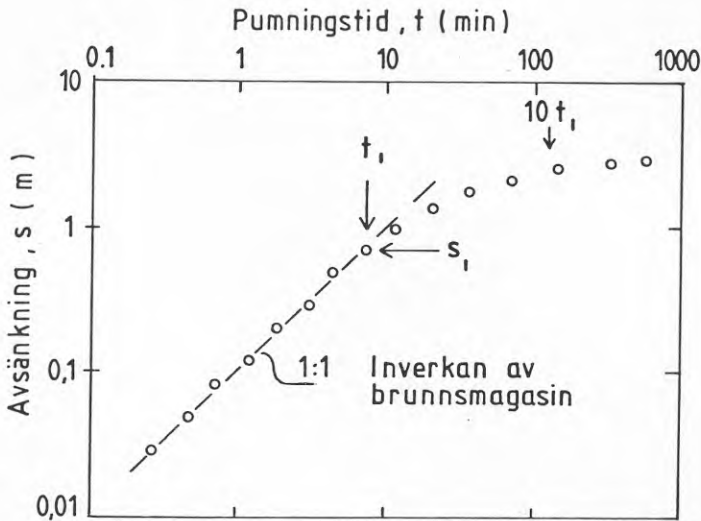


Fig 4.19 Avsänkning påverkad av brunnsmagasin.

Inledningen på avsänkingskurvan kommer att ha lutningen 1:1 då brunnen i inledningsskedet töms med konstant hastighet. Efter en tid, som beror på brunnens och akviferens egenskaper, böjer data av från den räta linjen och närmar sig asymptotiskt brunnfunktionen. Om tiden för avvikelserna bestäms till t_1 är det en god tumregel att utvärdering av data i en halvlogaritmisk avbildning inte är möjlig förrän efter tiden $10t_1$.

Om avsänkningen vid tiden t_1 är s_1 kan brunnsmagasinsfaktorn bestämmas som:

$$A_w = \frac{Q \cdot t_1}{s_1} \quad (4.28)$$

Detta värde kan sedan jämföras med vad som kan beräknas från uppgifter om brunnens geometri.

4.3.6 Utvärdering av transmissivitet och skinfaktor

Pumpningsdata uppritas i halvlogaritmisk och logaritmisk avbildning, se fig 4.20.

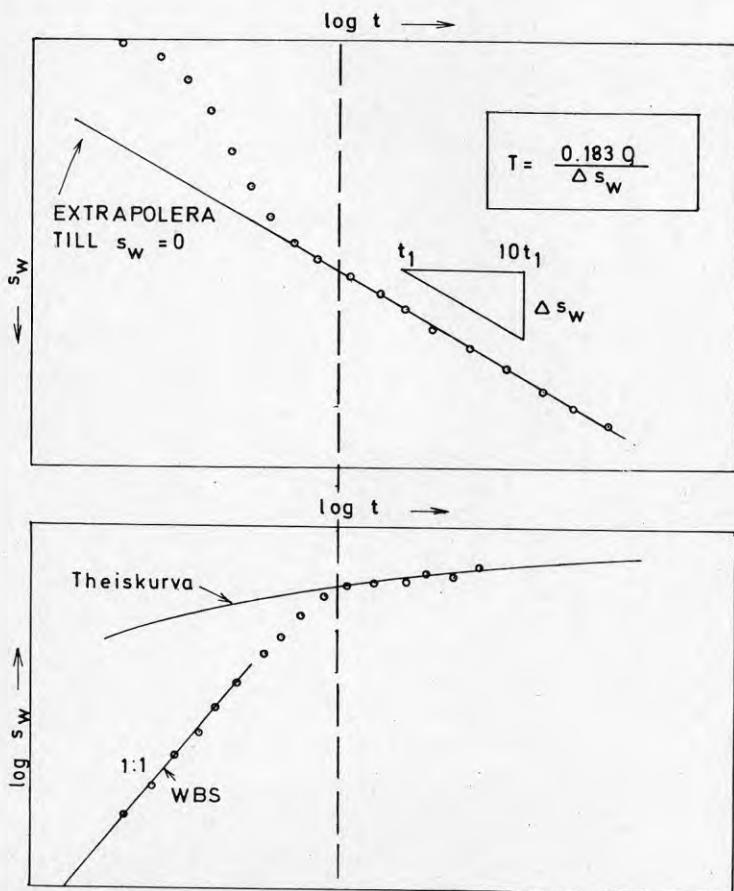


Fig 4.20 Utvärdering av transmissivitet och skinfaktor.

Från den logaritmiska avbildningen bestäms brunnsmagasinet, A_w , som kontrolleras mot brunnens volym. En tidpunkt efter vilken den halvlogaritmiska uppritningen kan utnyttjas bestäms. Lutningen hos datakurvan, Δs_w , bestäms och transmissiviteten beräknas enligt den givna formeln.

När skinfaktorn skall bestämmas utnyttjas förhållandet att avsänkingsökningen på grund av skinffekten, s_s , är konstant under pumpningen. Om den räta delen av avsänkingskurvan extrapoleras till nollinjen skäres denna vid tiden t_0 . Linjen $s_w - s_s$ skär nollinjen vid tiden t_{of} . Från detta kan s_s bestämmas som:

$$s_s = \Delta s \cdot \log t_{of}/t_0 \quad (4.29a)$$

Med kännedom om transmissiviteten, T , och en rimlig uppskattning på den elastiska magasinskoefficienten, S_a , kan, t_{of} , beräknas med ekvation (4.20e).

$$t_{of,min} = \frac{S_a r_w^2}{135 T} \quad (4.29b)$$

Om ekvationerna (4.20d) och (4.24) kombineras erhålles:

$$\xi = 1,15 \log t_{of}/t_0 \quad (4.29c)$$

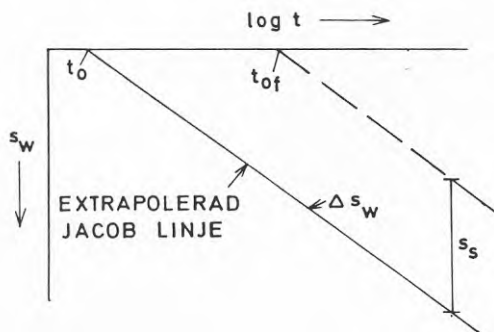


Fig 4.21 Bestämning av skinfaktor.

4.3.7 Brunnens effektivitet

Avsänkningarna i en brunn kan delas upp i två delar:

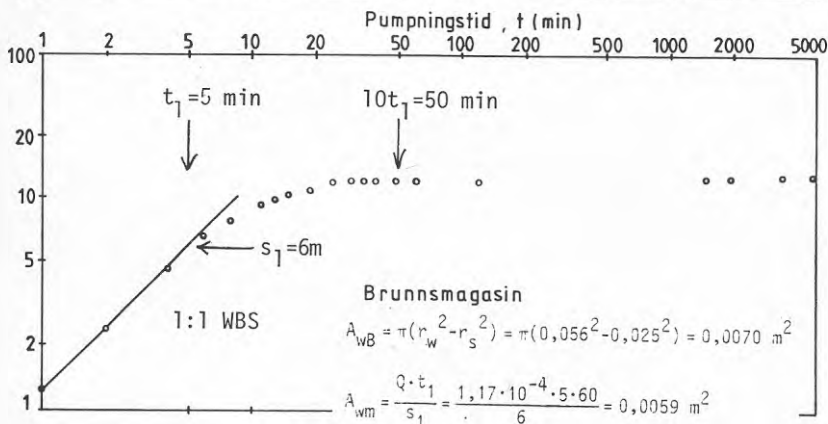
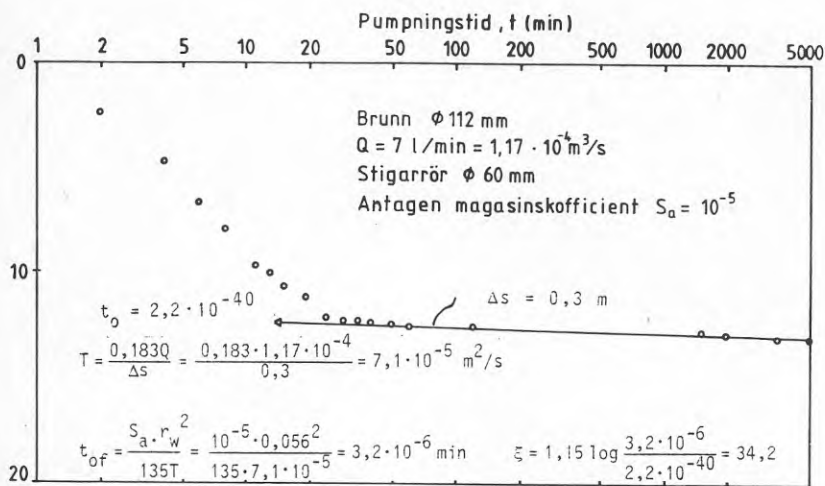
- σ avsänkningar i grundvattenmagasinet
- ξ avsänkningar beroende på brunnens konstruktion, utförande, igensättningar m m.

Brunnens egenskaper kan således bestämmas genom pumpning och dess effektivitet kan definieras med följande parametrar:

$$\eta = \frac{\sigma}{\sigma + \xi} = \frac{s_w - s_s}{s_w} \quad \text{effektivitetstal} \quad (4.30a)$$

$$N = \frac{\sigma + \xi}{\sigma} = \frac{s_w}{s_w - s_s} \quad \text{igensättningstal} \quad (4.30b)$$

$$1 - \eta = \frac{\xi}{\sigma + \xi} = \frac{s_s}{s_w} \quad \text{igensättningsfaktor} \quad (4.30c)$$



BRUNNENS EFFEKTIVITET

$$\sigma = 0,5 \left(-0,5772 - \ln \frac{r_w^2 S}{4Tt} \right) = 0,5 \left(-0,5772 - \ln \frac{0,056^2 \cdot 10^5}{4 \cdot 7,1 \cdot 10^{-5} \cdot 60 \cdot 5000} \right) = 10,6$$

$$\eta = \frac{\sigma}{\sigma + \xi} = \frac{10,6}{10,6 + 34,2} = 0,24 \quad N = \frac{\sigma + \xi}{\sigma} = 4,23 \quad 1 - \eta = 0,76$$

Fig 4.22 Utvärdering av transmissivitet, skinfaktor och effektivitet.

4.3.8 Sammanfattande formler

FORMLER FÖR AVSÄNKINGSBERÄKNINGAR

Slutet grundvattenmagasin, stationära förhållanden

$$s_w = \frac{Q}{2\pi T} \left(\ln \frac{R_o}{r_w} + \xi \right) \quad \text{Thiem}$$

Öppet grundvattenmagasin, stationära förhållanden

$$s_w = \frac{Q}{2\pi T_o} \left(\ln \frac{R_o}{r_w} + \xi \right) + \frac{\left(\ln \frac{R_o}{r_w} \right)^2}{8h_o\pi^2 T_o^2} \cdot Q^2$$

Slutet grundvattenmagasin, transienta förhållanden

$$s_w = \frac{Q}{2\pi T} \left[0,5 \left(\ln \frac{Tt}{r_w^2 S} + 0,8091 \right) + \xi \right]$$

Öppet grundvattenmagasin, transienta förhållanden

$$s_w = \frac{Q}{2\pi T_o} \left[0,5 \left(\ln \frac{T_o t}{r_w^2 S} + 0,8091 \right) + \xi \right] + \frac{\left(\ln \frac{R_o}{r_w} \right)^2}{8h_o\pi^2 T_o^2} \cdot Q^2$$

UTVÄRDERINGSFORMLER

$$T = \frac{2,30}{4\pi} \cdot \frac{Q}{\Delta s} = 0,183 \frac{Q}{\Delta s} \quad \text{Transmissivitet, Jacob}$$

$$S = \frac{2,25 T t_o}{r_w^2 S} = \frac{135 T t_{o, \min}}{r_w^2 S} \quad \text{Magasinskoefficient, Jacob}$$

$$\xi = 1,15 \cdot \log t_{of}/t_o \quad \text{Skinfaktor}$$

5. VATTENKVALITET OCH KORROSION

Grundvatten innehåller alltid lösta salter. En del följer med den nederbörd, som bildar grundvattnet, huvuddelen tillföres normalt vattnet i markvattenzonen och en del utlöses ur den jord eller berggrund som bildar grundvattenmagasinet. Följande kapitel beskriver något om grundvattnets sammansättning, vilka krav man skall ställa på ett konsumtionsvatten och hur vattnets egenskaper styr processer som korrosion och igensättning.

5.1 Grundvattnets sammansättning

5.1.1 Nederbördens saltinnehåll

Genom den försurning, som sker i landets insjöar har vi blivit medvetna om att regnvattnet innehåller svavel i form av svavelsyra. Det är emellertid inte de enda kemiska beståndsdelar, som nederbörden för med sig. Från kusten sprides havssalt långa sträckor och är i de områden, som tidigare inte varit täckta av hav, den huvudsakliga kloridkällan. För att få en uppfattning om de mängder, som tillföres, visas det årliga nedfallet av svavel och klorid i fig 5.1 (Eriksson,1960).

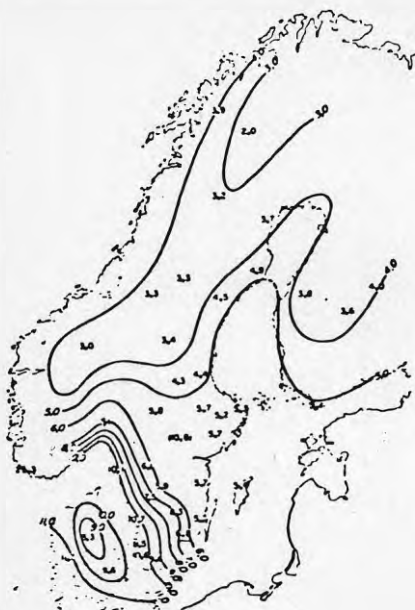


Fig. 6.5. Sulphur in precipitation over Scandinavia in $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{year}^{-1}$. Average for 1955 to 1957 (3 years).

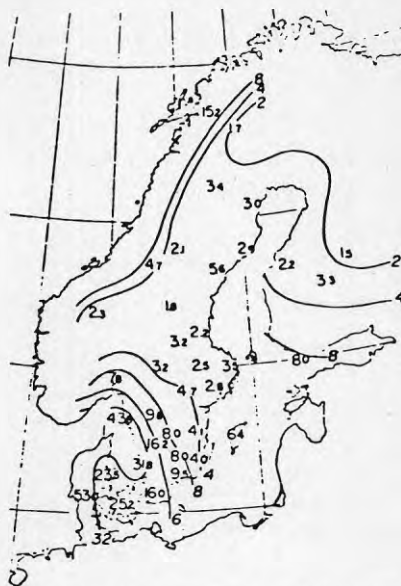


Fig. 6.1. Chloride in precipitation over Scandinavia in $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{year}^{-1}$. Average for 1955 to 1957 (3 years).

Fig 5.1 Nedfallet av svavel och klorid över Skandinavien.

Genom att en stor del av nederbörden avdunstar igen sker en koncentration av salthalten innan vattnet når grundvattenzonen. De ovan angivna mängderna skall således fördelas på nettonederbörden, nederbörd minus avdunstning.

5.1.2 Grundvattenbildningsprocessen

Innan nederbördsvattnet når grundvattenzonen måste det passera genom ett komplicerat magasinssystem, där flera kemiska och biologiska processer sker. Fysikaliskt kan förloppet förenklat beskrivas som en serie reservoarer med olika egenskaper, se fig 5.2.

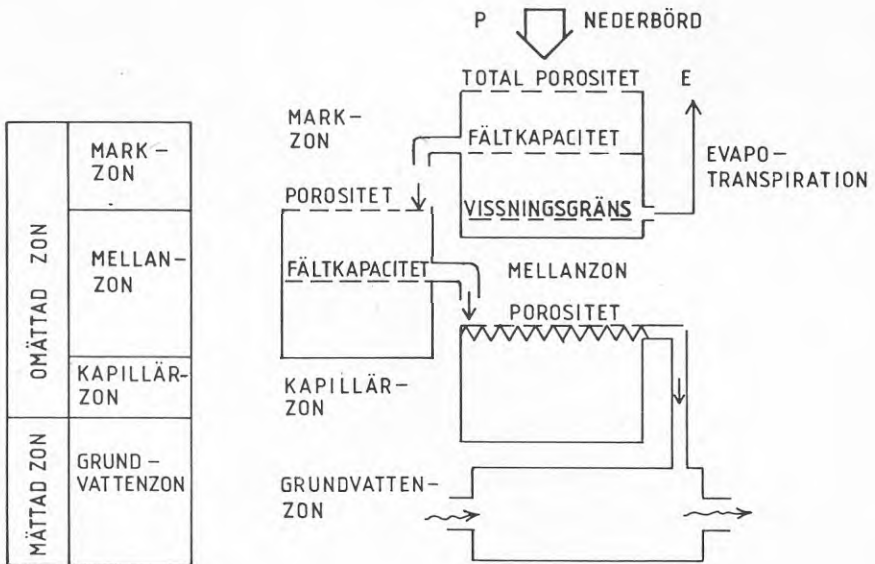


Fig 5.2 Den omättade zonens magasinssystem.

De olika reservoarerna symboliserar delar av jordprofilen. Varje reservoar kan maximalt ha en vattenhalt som motsvarar den totala porositeten. Under tyngdkraftens inverkan kan vatten dräneras ned till fältkapaciteten, som är den vattenhalt jorden högst kan hålla kapillärt bunden. Vattenhalten kan sedan genom växternas upptagning sänkas ned till vissningsgränsen.

Nederbördsvattnet infiltrerar till markvattenzonen. Under förutsättning att vattenhalten är högre än fältkapaciteten kan det perkolera vidare och bilda grundvatten. Är vattenhalten lägre kan växterna ta upp vatten ned till vissningsgränsen. Detta vatten transpirerar till atmosfären. Grundvattenbildningen är således väsentligt lägre än infiltrationen.

Mellanzonen är en transiteringszon för det perkolerande vattnet. Perkolation sker vid vattenhalt högre än fältkapaciteten.

Vattnet i kapillärzonen har stigit kapillärt från grundvattenzonen. Vattenhalten ligger nära mättnad.

I grundvattenzonen är porsystemet fyllt. Vattentransport sker huvudsakligen horisontellt.

5.1.3 Kemiska och biologiska processer i markzonen

De mest aktiva kemiska och biologiska processerna som påverkar grundvattnets sammansättning pågår i markvattenzonen. Detta beror dels på närheten till markytan och de biokemiska processer som pågår där, dels på att det öppna porsystemet medger gasutbyte med atmosfären. En förenklad bild av förloppen i markzonen ges i fig 5.3 (Eriksson,1960).

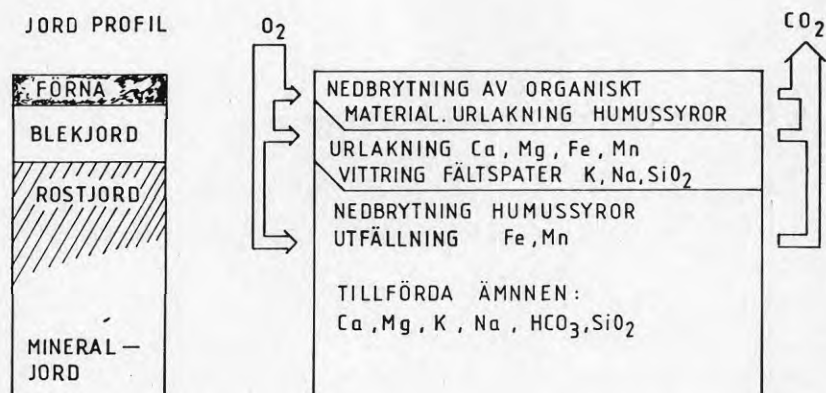


Fig 5.3 Processer i markzonen.

Mineraltillförseln sker huvudsakligen genom vittring och utlösning orsakad av humussyror från förnan och kolsyra bildad vid nedbrytningen av organiskt material. De utlösta jonerna är främst kalium, magnesium och mangan. I rostjordskiktet fälls åter järn och mangan ut, då gasutbytet med atmosfären medger syretillförsel, som oxiderar järn och mangan.

Den dominerande negativa jonen är i vanliga fall vätekarbonat.

5.1.4 Kemiska processer i grundvattenzonen

I grundvattenzonen kan ytterligare joner tillföras. Dels kan ett ändrat mineralinnehåll medföra att en förändrad jonbalans inställer sig. Dels kan genom den långa uppehållstiden långsamma kemiska processer få tid att verka, som t ex utlösning av kalium från vittrade fältspater. Till de viktigaste processerna i grundvattenmagasinet hör emellertid urlakning av ämnen, som hör samman med sedimentens eller bergarternas bildning. Hit hör t ex urlakning av natriumklorid, NaCl, från finsediment bildade i marin miljö. Detta är den avgörande faktorn för att höga kloridhalter förekommer i flera områden under den högsta kustlinjen i Sverige.

5.2 Vattenanalyser

Vattenanalyser utföres av flera laboratorier med moderna metoder och god tillförlitlighet. För att provet skall bli rättvisande fordras emellertid att det tas på ett riktigt sätt. Grundvattenprover tas ofta ur provisoriska brunnar eller observationsrör vilka inte alltid ger ett klart vatten fritt från partiklar, främst från formationen. Genom analysförfarandet kan metalljoner utlösas från dessa mineralkorn. Om vattenprov tas från ett undersökningsrör måste provtagningen ske efter pumpning under så lång tid att vattnet är klart.

5.2.1 Kvalitetskrav

Kraven på vattnets kemiska sammansättning varierar självfallet efter vad det skall användas till. Normgivande för konsumtionsvatten är Medicinalstyrelsens (Socialstyrelsen) bestämmelser 1950.

I tabell 5.1 redovisas dessa bestämmelser.

Tabell 5.1 Vattenkvalitetskrav.

UNDERSÖKNING	ENHET	Med styr tillfr	Med styr anm	Med styr ej tjänl	VAV
Provtagningsdatum					
Tidpunkt					
Temperatur (enl uppgift)	°C				
Färg	mg/l Pt	0-20	21-40	>40	<5
Grumlighet	ZP-enheter		svag	tydlig	ingen
Lukt, styrka			svag	tydlig	ingen
Lukt, art					
Bottensats					
pH (pot)					7-9
Ledningsförmåga x 10 ⁴ , 25°C	ohm ⁻¹ cm ⁻¹				
Permanganatförbrukning	mg/l KMnO ₄	0-20	21-40	>40	<5
Järn	Fe mg/l	0-0.2	0.2-0.4	>0.4	<0.1
Mangan	Mn "	0-0.1		>0.1	<0.05
Fosfat	PO ₄ "				
Ammonium	NH ₄ "		>0.5		<0.5
Nitrit	NO ₂ "		>0.02		<0.02
Nitrat	NO ₃ "		>30		<50
Sulfat	SO ₄ "				<250
Bikarbonat	HCO ₃ "				
Klorid	Cl "	0-100	100-300	>300	<200
Kalcium	Ca "	0-100	>100		40-80
Magnesium	Mg "				<30
Totalhårdhet	°dH	0-14	>14		
Kolsyra, marmoraggressiv ber	CO ₂ mg/l				0
Kiselsyra	SiO ₂ "				<5
Aluminium					<0.1
Fluorid					<1.5
Totala ant bakterier	22 °C 48 t antal/ml			>100	
Totala ant califorma bakt	35 °C 48 t antal/100 ml	0-2	2-20	>20	
Ant termotabila colif bakt	44 °C 48 t antal/100 ml				

Det bör påpekas att dessa krav ställs på det vatten som en kommun levererar till sina konsumenter. Det vatten som en brunn ger uppfyller inte alltid dessa krav utan måste behandlas.

5.3 Korrosion och igensättningar

Korrosion och igensättning på filterrör, brunnrör och installationer kan allvarligt förkorta brunnens livslängd.

Korrosion kan definieras som kemisk påverkan på olika material orsakad av yttre faktorer, och som medför att materialet förs bort eller förstörs.

Igensättning kan vara en effekt av korrosion men beror till stor del på utfällningar från vattnet. Utfällning kan ske på kemiska, fysikaliska eller mikrobiologiska grunder. Det ursprungliga grundvattnet står i balans med sin omgivning i grundvattensmagasinet. Utfällning sker då denna balans rubbas i samband med att vattnet uppfordras.

5.3.1 Allmänt om korrosion

Genom olika studier har man funnit att korrosion angriper metaller på olika relativt väldefinierade sätt. I alla dessa fall har man dock funnit att elektrokemiska reaktioner spelar en viktig roll. De olika formerna är:

- ytkorrosion fördelad jämt över metallytan följt av metallförlust
- selektiv korrosion av någon korrosionsbenägen metall i en legering
- bimetallisk korrosion där två olika metaller förenats
- korrosion koncentrerat i punkter s k pittingkorrosion med stor metallförlust i korrosionspunkterna
- spänningskorrosion inducerad i sprickor i metallen där spänningarna är höga
- korrosion i fickor och springor i konstruktionen s k spaltkorrosion
- Avlagringskorrosion som uppkommer under avlagringar p g a att koncentrationsceller uppstår. Koncentrationsceller

uppstår av olika syrehalter (luftningsceller) eller koncentrationer mellan ämnen.

Metallförlusten vid korrosionsförloppet orsakas av elektrokemiska processer vid metallytan och i den omgivande vätskan, elektrolyten. Om t ex en järnplåt och en mässingsplåt förbundna med en ledare sänks ned i en saltlösning, kommer järnplåten att lösas upp, se fig 5.4.

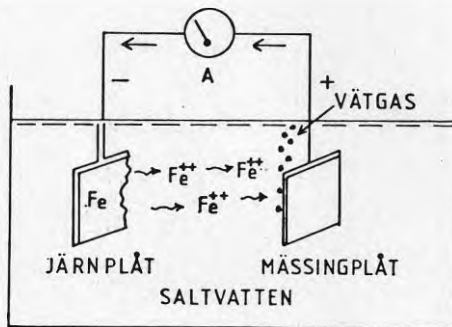


Fig 5.4 Galvanisk cell mellan två olika metaller.

Mellan plåtarna uppkommer en elektrisk ström genom elektrolyten, som sluts genom ledaren tillbaka till järnplåten. Om ytterligare salt sätts till vattnet ökar strömstyrkan. Järnet korroderar som ett resultat av den elektrokemiska processen och rost bildas, som fastnar på elektroden eller faller ned på botten i kärlet.

Vid mässingplåten kommer små mängder vätgas att frigöras, som bubblar upp till ytan.

Orsaken till de elektrokemiska processerna ligger i egenskaper hos metallerna själva. Järn har större tendens att korrodera än mässing och zink större än järn. Den relativa korrosionsbenägenheten kan uttryckas som spänningsskillnaden mellan elektroder av

olika material. Som referenselektrod har en vätgaselektrod valts och spänningskillnanden mot denna benämnes normalpotential. En uppställning av data på normalpotentialer kallas spänningskedjan, tabell 5.2.

Tabell 5.2 Spänningskedjan för olika metaller och legeringar.

Normalpotential (Volt)	Metall	
-2.34	Magnesium, Mg	Korrosion
-1.70	Aluminium, Al	
-0.76	Zink, Zn	
-0.44	Järn, Fe	
-0.40	Kadmium, Cd	
	Rostfritt stål (Syrefri miljö)	
-0.14	Tenn, Sn	
-0.13	Bly, Pb	
+0.00	Väte, H	
	Mässing, Brons	
+0.34	Koppar, Cu	
	Rostfritt stål (I närvaro av syre)	
+0.80	Silver, Ag	
+1.36	Guld, Au	Skydd

Ju längre från varandra metallerna ligger i spänningskedjan desto större blir potentialskillnanden och korrosionshastigheten ökar. Orsaken till bim metallisk korrosion är därför uppenbar om sådana metallkombinationer väljes i en brunn att stora spänningskillnader uppstår. Emellertid avtar verkan relativt snabbt och den bim metalliska korrosionen verkar mest närmast skarven mellan legeringarna, se figur 5.5.

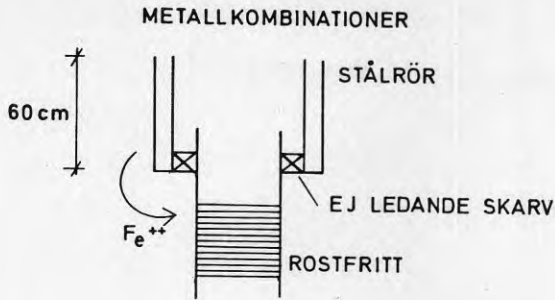


Fig 5.5 Bimetallisk korrosion vid skarv.

Elektrokemiska reaktioner kan uppkomma inte bara mellan olika metaller utan också mellan en metall och dess oxid, som t ex mellan järn och rost. Om rosten ligger kvar på ytan kan då korrosionen koncentreras till en punkt, pittingkorrosion, se figur 5.6.

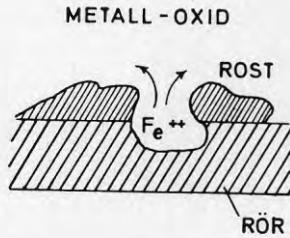


Fig 5.6 Pittingkorrosion.

En liknande princip kan utnyttjas för korrosionsskydd. Om järn belägges med en metall som korroderar lättare, t ex zink, kommer korrosionen av beläggningen att medföra att zinkjoner kommer att vandra från ytbläggningen till en skada som når järnskiktet, se figur 5.7. Detta är principen för galvanisering.

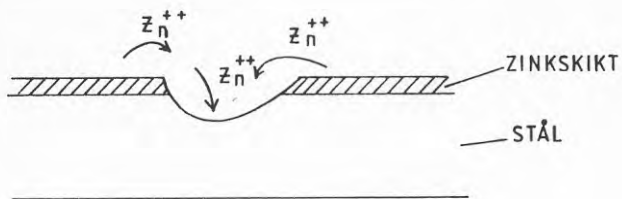


Fig 5.7 Galvanisering.

5.3.2 Korrosionens inverkan på ett brunnsfilter

Den mest uppenbara inverkan av korrosion är en kollaps av filterröret, fig 5.8.



Fig 5.8 Filterrörsbrott p g a korrosion

Lika allvarligt är om slitsöppningarna i filterröret vidgats genom korrosion så att öppningen blir så stor att filtermaterialet kan passera in i brunnen, fig 5.9.

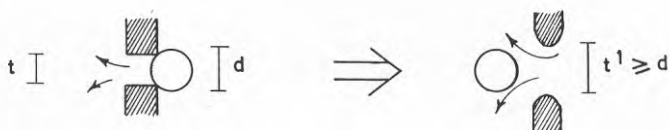


Fig 5.9 Korrosion i slitsöppningar.

Brunnen kommer då att ge sand, som kan ge allvarligt slitage på pumpar och andra installationer.

Vid korrosionen bildas som tidigare nämnts olika korrosionsprodukter, hydroxider, oxider mm. Dessa kan åter avsättas på filtrerröret och medföra att detta sätter igen, fig 5.10.

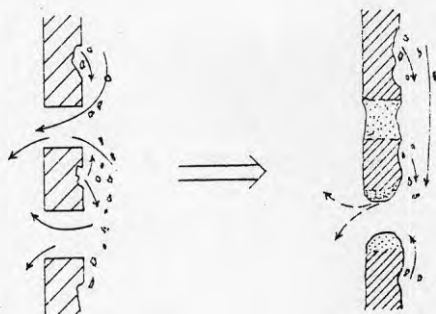


Fig 5.10 Igensättningar av korrosionsprodukter.

5.3.3 Allmänt om igensättning

Igensättningar kan ske av korrosionsprodukter men även genom utfällning av vattnets kemiska beståndsdelar, speciellt kalciumkarbonat samt olika karbonater och hydroxider av järn och mangan.

Flera kemiska jämvikter är tryckberoende som t ex systemet kalk-kolsyra. Då vattentrycket alltid är lägst i brunnen är risken för utfällningar störst här. Trycket beror även på vattnets hastighet enligt följande. För strömning mellan två punkter gäller allmänna energiekvationen

$$\left(\frac{v^2}{2g} + \frac{P}{\rho g} + z\right)_1 = \left(\frac{v^2}{2g} + \frac{P}{\rho g} + z\right)_2 + \text{förluster}$$

där index 2 markerar en punkt som ligger nedströms punkt 1. Ligger punkterna nära varandra kan förlusterna försummas. I slitsarna är hastigheten högre än utanför. Därför blir trycket lägre och risken för utfällning ökar. fig 5.11.

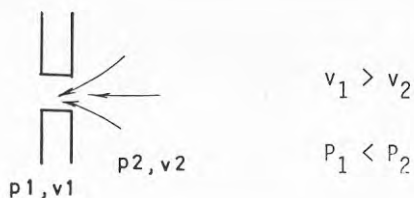


Fig 5.11 Trycksänkning i slitsar vid turbulent strömning.

Vid höga kalkhalter i vattnet bör man således dimensionera filterröret så att laminära förhållanden råder i slitsarna.

5.3.4 Vattenkvalitet

Som framgår av det tidigare har korrosion och igensättningar samband med vattenkvalitet och material i brunnsfiltret. Vattnets sammansättning kan därför ge viktig information om korrosion eller igensättningar kommer att ske.

5.3.4.1 Korrosion

Det förekommer ofta inom vattentekniken att man sätter likhets-tecken mellan korrosions- och stabilitetsparametrar (exempelvis Langliers Index och Ryznar Stability Index) i samband med vattnets aggressivitet. Detta är emellertid inte korrekt.

Korrosion som fenomen förutsätter ett termodynamiskt instabilt system, vilket inom vattentekniken kan utgöras av en elektrolytlösning tillsammans med ledningsnät, panna, behållare m.m. Sistnämnda tillverkas oftast av gjutjärn, betong, stål, koppar eller syntetiska material. Stabiliteten i sådana system, eller rättare sagt bristen på stabilitet i sådana system, uppenbarar sig i regel som korrosivitet. Korrosiviteten kan således definieras som ett reaktionskomplex mellan vattnet och dess omgivning. Korrosiviteten hos vatten kan följaktligen inte definieras utan att hänsyn tas till det konstruktionsmaterial, som utgör vattnets omedelbara omgivning. Som en följd av detta varierar

vattenkorrosiviteten med de konstruktionsmaterial, med vilka vattnet är i omedelbar kontakt.

Korrosionen är en kemisk reaktion, som kan definieras på termodynamisk grundval. Varje naturligt system strävar mot det mest stabila tillståndet, dvs det tillstånd där halten fri energi är lägst. Reaktioner som motverkar detta kan enbart komma till stånd genom energitillförsel.

Våra vanligaste metaller utvinns ur sina naturliga förekomstformer, t ex ur oxider genom tillförsel av energi. Detta energitillskott kan vara av betydande storlek, t ex vid aluminiumframställning. Som en följd av detta är de rena eller de tekniska metallerna i regel i ett termodynamiskt instabilt tillstånd och de övergår via spontana reaktioner till den stabilare oxidformen. Denna typ av spontana reaktioner kallas i vissa sammanhang för korrosionsprocesser. I andra fall kan stabiliteten i konstruktionsmaterial öka genom omkristallisering med minskad hållfasthet som följd.

Det kan inte förväntas att den mångfald av kemiska reaktioner, som vanligen sammanfattas som korrosivitet, ska kunna beskrivas med en enda modell. Korrosion är snarare som en samlingsterm för skadeeffekter i olika system av konstruktionsmaterial i kontakt med elektrolytlösning.

De stabilitetsparametrar som tidigare nämnts beskriver vattnets jämvikt med avseende på kalk-kolsyra. Tillman postulerade ett samband mellan kalkmättnad och korrosiva processer i vattenledningsnät. Langlier definierade kalkaggressiviteten som en karakteristisk egenskap hos vatten, för vilka det aktuella pH-värdet (pH) avviker från det teoretiskt (pH_s) förutsagda värdet. Han lanserade härvid Langliers index (LI), $pH_s - pH$. Ryznar lanserade härefter sitt eget modifierade LI dvs Ryznar Stability Index $RSI = 2pH_s - pH$.

Inom brunnstekniken används ofta RSI för att bedöma ett vattens korrosivitet. Som redan nämnts är korrosivitet ett reaktionskomplex mellan vattnet och dess omgivning. RSI anger därför strikt enbart korrosiviteten på betong.

Istället för att beskriva vattnets korrosivitet kan man se på vattnets förmåga att bilda skyddsskikt som skyddar materialet från angrepp. Även i detta sammanhang måste man studera kombinationen vatten - material. Stabilitetsparametrarna LI och RSI används även i detta sammanhang då de beskriver om vattnet är kalkfällande eller inte. En kalciumkarbonat-fällning skulle då bilda ett skyddsskikt. Man menar dock att kalciumkarbonat inte är den mest önskvärda sammansättningen på ett skyddsskikt då det är relativt poröst.

De olika indexen's förmåga att beskriva bildandet av skyddsskikt och förhindrandet av korrosion framgår av följande två figurer.

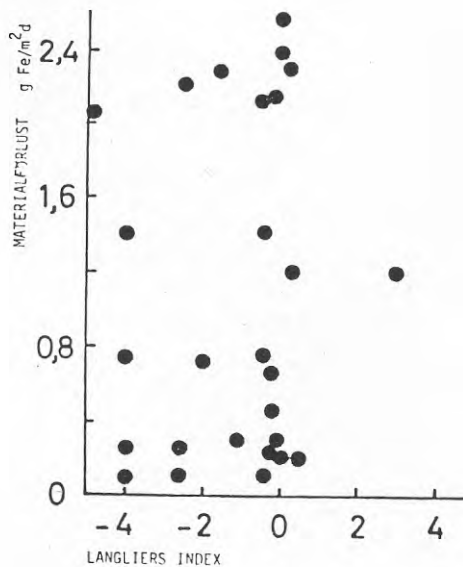


Fig 5.12 Korrosion på järn som en funktion av Langliers Index (enligt Stumm).

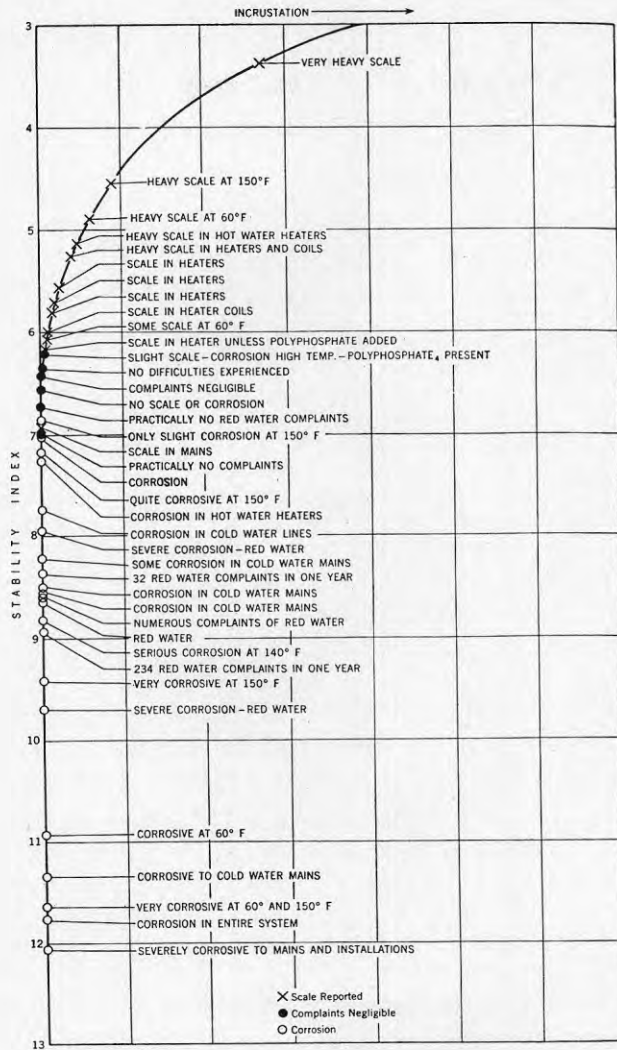


Fig 5.13 Korrosion som en funktion av Ryznar Stability Index (enligt Cambell-Lehr).

Nedan beskrivs viktiga faktorer som påverkar korrosion och skyddsskiktetsbildning på olika material. Texten har till större delen direkt hämtats ur broschyren "Vårt korrosiva vatten", AGA Gas AB.

Beskrivningen har disponerats efter olika material. De material som används till filterrör, förlängningsrör, kopplingar och installationer är:

Järn och stål
Förzinkat stål
Rostfritt stål
Syrafast stål
Plastbelagt stål
Plast
Trä
Mässing
Brons

Vissa av dessa bedöms som "korrosionsfria" t ex syrafast stål, plast och trä.

Järn och stål

Korrosionshastigheten bestäms av mängden syre i vattnet. Så länge som enbart järn finns närvarande och vattnet inte innehåller något annat än löst syre bildar korrosionsprodukterna inte något tätt skikt, som skyddar den underliggande metallen mot ytterligare korrosion. Korrosionshastigheten för järn i stillastående luftmättat vatten är av storleksordningen 0,1-0,2 mm/år.

Har vattnet ett lämpligt pH-värde och innehåller det dessutom vätekarbonat- och kalciumjoner, så kan förutom rost ($\text{Fe}(\text{OH})_2$, FeOOH) även järnkarbonat (FeCO_3) och kalciumkarbonat (CaCO_3) fällas ut och bilda skyddsskikt på metallytan. Man har bl a visat att ett skikt som innehåller flera fasta faser ger ett bättre skydd mot korrosion än enbart rost eller enbart kalciumkarbonat. Kalciumkarbonat har en stark tendens att bilda övermätade lösningar. Men genom att korrosion av järn äger rum samtidigt fälls kalciumkarbonat ut lättare och byggs på detta sätt in i korrosionsskiktet. Därigenom får man ett skikt vars sammansättning varierar med tjockleken, fig 5.14.

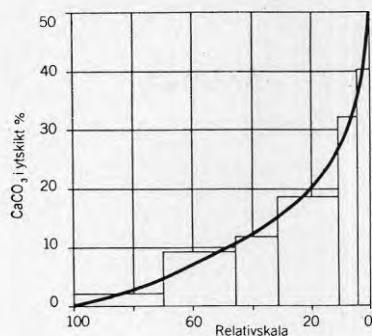


Fig 5.14 Ändring av korrosionsskiktets sammansättning med avståndet från metallytan.

Närvaron av karbonatjoner medför också att en del järnjoner (Fe^{2+}) bildar svårlösligt järnkarbonat på metallytan.

Närvaro av syre i vattnet är inte bara en förutsättning för att järn ska korrodera utan också nödvändig för att ett korrosionshämmande skikt ska kunna utbildas. För detta fordras en syrehalt i vattnet på 2-6 mg/l.

Vattenhastigheten bör vara 0,5 m/s. I t ex ändledningar där vattnet långa tider står stilla förbrukas syret vid korrosionen och ledningen blir anodisk i förhållande till den angränsande delen av röret. Om vattnet inte har tillräcklig buffertkapacitet kommer pH-värdet att sjunka på grund av hydrolys av järnjonerna.

Följande faktorer sänker således korrosionshastigheten:

Vattnet bör innehålla en viss minsta mängd kalciumjoner, vätekarbonatjoner, (HCO_3^-) och syre för att ett skyddande karbonat-skikt ska utbildas på metallytan. Karbonathårdenheten måste vara minst 3⁰d. Syrehalten bör vara ca 6 mg/l. pH-värdet ska justeras så att kalk-kolsyrjämvikt råder. Kloridhalten får inte överstiga 30 mg/l. Kopparhalten <1 mg/l.

Förzinkat stålrör

Förzinkade stålrör är i de allra flesta fall varmförzinkade. Det medför att det förutom zink på metallytan finns olika faser som innehåller järn. Fig 5.15 visar hur ett sådant skikt är uppbyggt. Överst finns ren zink, därunder ett skikt med 6-11,5% järn och närmast metallytan en fas med 21-28% järn.

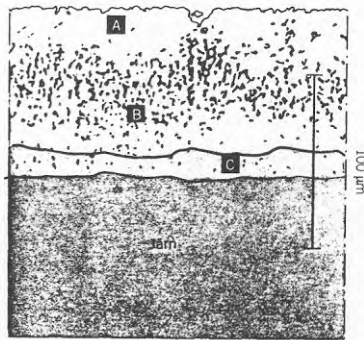


Fig 5.15 Snitt genom zinksiktet på ett förzinkat stålrör.
a) ren zink b) zink med 6-11,5% järn c) zink med 21-28% järn.

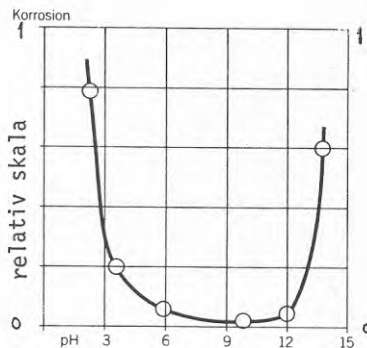


Fig 5.16 Korrosionshastigheten för zink som funktion av pH.

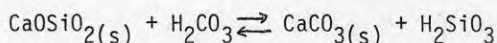
Korrosionen av ren zink är starkt beroende av pH-värdet. Det framgår tydligt av fig 5.16. I kallt vatten som innehåller karbonatjoner bildas i pH-området 7-10 ett svårslösligt skikt av basiskt zinkkarbonat, som dock kan omvandlas till ett mera lösligt zinkvätekarbonat vid höga halter av fri kolsyra. Bildningen av ett täcksikt innebär inte att korrosionshastigheten blir noll, utan man får en kontinuerlig upplösning och nybildning under förbrukning av zink. Allt eftersom zinken i ytskiktet förbrukas når man så småningom ned till legeringsfaserna som innehåller både järn och zink (fig 5.15). Järnhaltiga korrosionsprodukter kommer att byggas in i skiktet som då får utpräglade skyddsegenskaper. En förutsättning för att korrosionshastigheten ska bli låg är att vattnets pH-värde ligger inom ett lämpligt intervall, mellan 7.5 och 8.5, och att det innehåller karbonatjoner men ingen fri kolsyra. Nitrathalten bör vara låg.

Om koppar finns i vattnet bildas ett galvaniskt element mellan zink och koppar. Kopparhalten bör därför vara mindre än 0.1 mg/l.

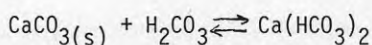
Rostfritt stål (18/8); kloridhalten bör vara mindre än 300 mg/l.

Cement förekommer endast i grävda schaktbrunnar.

Genom inverkan av sura vatten kan cementens beståndsdelar, som kalciumsilikat och kalciumaluminat, överföras till lösliga föreningar. I vatten som innehåller fri kolsyra kan en utlösning av cementen ske enligt formeln:



Det bildade kalciumkarbonatet kan sedan överföras till lösligt vätekarbonat enligt:



vilket innebär en avkalkning av cementen.

I cementens porer finns en mättad lösning av kalciumhydroxid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) som med fri kolsyra bildar svårslösligt kalciumkarbonat i ytskiktet. Denna karbonatisering medför att porerna täpps igen och kolsyreangreppet hämmas. Kolsyreangreppet beror då på i vilken utsträckning kalciumkarbonat kan överföras till kalciumvätekarbonat ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$) och står i relation till vattnets innehåll av karbonatjoner, kalciumjoner och pH-värde.

Sammanfattningsvis kan sägas att vattnets halt av fri kolsyra ska vara låg. Kalciumjonhalten, vätekarbonathalten och pH justeras så att man har kalk-kolsyrajämvikt. RSI <7.

Erfarenheter visar att cementrör kan användas i vatten med en karbonathårdhet på över 3^0d och upp till 80 mg/l fri kolsyra. (Gränsvärdet för fri kolsyra är dock inte skarpt definierat.) Sulfathalten har ingen praktisk inverkan på upplösning av kalciumkarbonat.

Koppar

Koppar förekommer vanligen ej i brunnskonstruktionen utan först i serviceledningarna. Materialet anses dock ha ett sådant allmänt intresse att det diskuteras här. Allmänkorrosionen på kopparrör är låg, ca $10\mu\text{m}$ per år. Det beror på att kopparytan efter en tids användning blir täckt med ett tätt passiverande skikt av kopparhydroxidkarbonat. Men detta skikt kan lokalt brytas ned och ge upphov till punktangrepp, där upplösningen av metallen går mycket snabbare.

Man kan skilja mellan tre olika typer av punktangrepp: Typ I förekommer främst i kallvattenledningarna av mjuka eller halvhårda kopparrör. De förekommer främst i anläggningar med hårt eller medelhårt grundvatten och kan sättas i samband med en kolfilm som bildas på rörens insida vid tillverkningen. Typ II förekommer praktiskt taget bara i varmvatten där pH-värdet är lågt och där vätekarbonat-sulfatförhållandet i vattnet är lågt. På senare tid har även en korrosionstyp som kallas typ III uppmärksamats.

Angreppet är ingen renodlad punktfrätning utan beskrivs som korrosion av en begränsad yta med inslag av punktfrätor. Man har konstaterat förekomst av svavel i korrosionsprodukterna och det antyder att en bakteriell reduktion av sulfat kan vara en orsak. Angreppen har uppstått i alkaliska vatten med låg karbonathårdhet och med låga halter av klorid och sulfat. Vätekarbonat-sulfatförhållandet uttryckt i mg/l ska därför vara större än 1, annars finns risk för punktfrätning.

Mässing

Den allmänna korrosionen av mässing följer i stort sett samma mönster som för koppar. En viktig skillnad är att ytterligare en korrosionstyp, avzinkning, kan äga rum. Avzinkning innebär att zinkatomer i legeringen löses ut selektivt och lämnar kvar ett poröst lager av koppar. Avzinkningen kan ske som punkt- eller skiktavzinkning. Vid punktavzinkning har angreppet bara liten utbredning, men tillväxten på djupet sker istället relativt hastigt. Skiktavzinkningen har däremot stor utbredning, men angreppet har lägre hastighet.

Av erfarenhet vet man att vattnets sammansättning påverkar avzinkningen. Det gäller förekomsten av vätekarbonat och klorider. Ett lågt vätekarbonat-kloridförhållande påskyndar avzinkningen. Dessutom ökar angreppshastigheten med temperaturen. Fig 5.17 visar avzinkning vid olika vätekarbonat-kloridförhållanden, som observerats vid prov i laboratorier och i vattenverk. pH bör ligga under 8,3.

Övrigt

Halten nitrat och nitrit har i allmänhet ingen betydelse, även om zinkhaltiga material kan angripas. Ammoniak skyddar järn, men angriper kopparhaltiga material. Ammoniumjonhalten (NH_4^+) bör därför ligga under 20 mg/l. Fosfat och silikat verkar korrosionshämmande. En halt av järn och mangan över 0,2 mg/l är skadlig för koppar och kopparhaltiga material. Organiskt material

påverkar skyddsskiktets bildningen. Man tror att små molekyler förbättrar skyddet medan stora försämrar det.

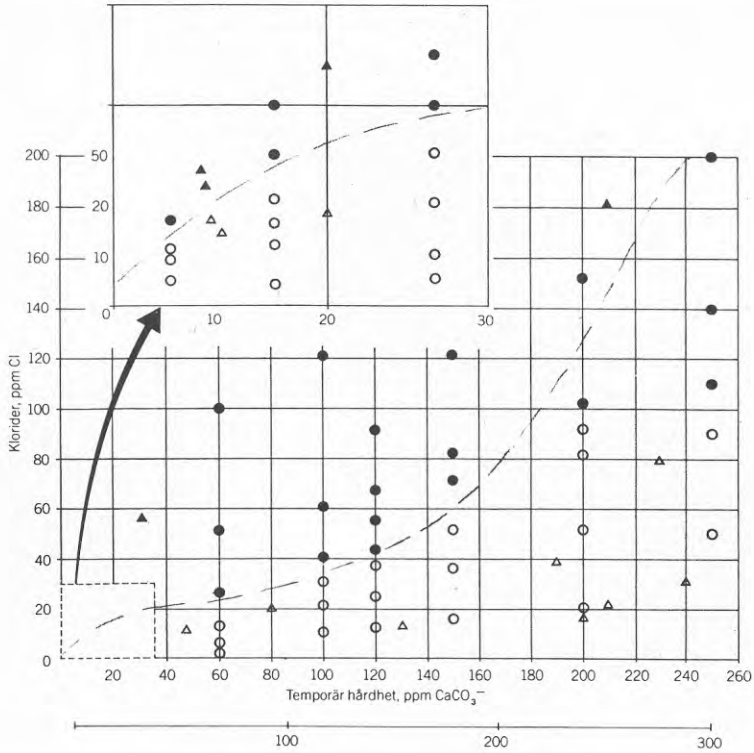


Fig 5.17 Klorid- och karbonathaltens inverkan på avzinkning av mässing. ○ Laboratorieprov, ingen avzinkning. ● Laboratorieprov, avzinkning. △ Vattenverk, ingen avzinkning. ▲ Vattenverk, avzinkning.

För den som skall dimensionera en brunn och välja material på filterrör, förlängningsrör och kopplingar finns inga eller ringa möjligheter att förändra vattnets sammansättning. Man måste därför välja ett korrosionsfritt material om skyddsskiktets bildningen bedöms vara dålig.

5.3.4.2 Igensättning

Igensättning sker p g a utfällning av kalcium-, järn- och manganprodukter men även av korrosionsprodukter. Utfällning av kalciumkarbonat fortgår vanligen efter Tillmans teori och kan uppskattas med t ex RSI.

Utfällning av järn (och mangan) sker efter andra betingelser.

Ryznar Stability Index (RSI)

För att karakterisera ett vattens kalciumkarbonat-fällande egenskaper används olika parametrar. Det s k Ryznar Stability Index (Ryznar 1944) grundar sig precis som Langliers Index på Tillmans teori. Index-talet beskrivs av kalkmättnads-pH (pH_s) och rådande pH-värde (pH).

$$RSI = 2 pH_s - pH$$

Kalkmättnads-pH kan bestämmas med följande formel:

$$pH_s = (pK_2^1 - pK_s^1) + pCa + pAlk$$

$$K_2^1 = \text{andra dissociationskonstanten för } HCO_3$$

$$K_s^1 = \text{aktivitetsprodukten för } CaCO_3$$

$$Ca = \text{kalciumkoncentrationen, mol/l}$$

$$Alk = \text{alkaliteten, } HCO_3^- \text{ mol/l}$$

$$p = \text{negativ 10-logaritm}$$

För att enkelt beräkna kalkmättnads-pH har flera hjälpdigram konstruerats främst för att beräkna $(pK_2^1 - pK_s^1)$. Ett exempel efter Langlier(1936) ges i fig 5.18.

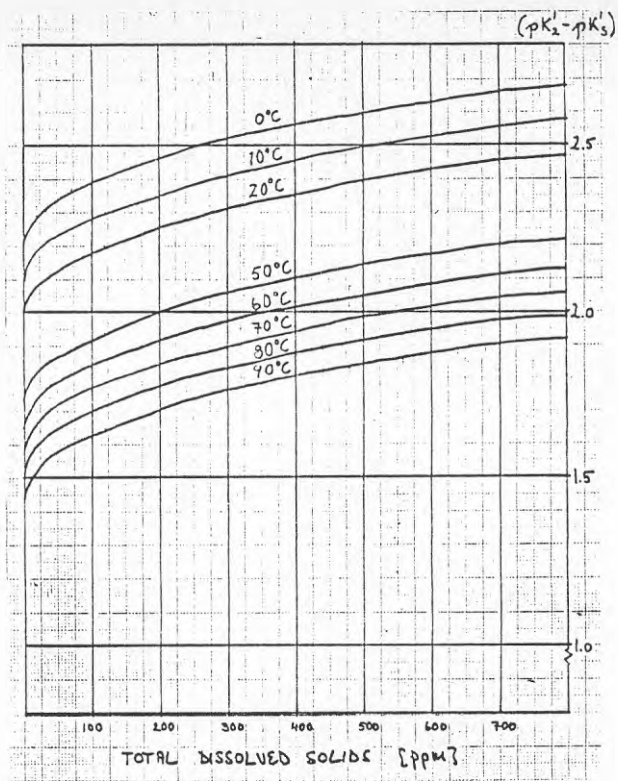


Fig 5.18 Beräkning av RSI.

Då RSI < 7 är vattnet kalkfällande. Då RSI > 7 är vattnet kalkupplösande.

Som tidigare nämnts sätts ibland likhetstecken mellan kalkupplösande och korrosiv.

EXEMPEL

UNDERSÖKNING	ENHET	A	B
Provtagningsdatum			
Tidpunkt			
Temperatur (enl uppgift)	°C	7.0	7.0
Färg	mg/l Pt	5	4
Grumlighet	ZP-enheter	30	19
Lukt, styrka		ingen	ingen
Lukt, art			
Bottensats		ingen	ingen
pH (pot)		6.8	7.1
Ledningsförmåga x 10 ⁴ , 25°C	ohm ⁻¹ cm ⁻¹	170	279
Permanganatförbrukning	mg/l KMnO ₄	4	2
Järn	Fe mg/l	0.05	0.04
Mangan	Mn "	<0.01	0.01
Fosfat	PO ₄ "	<0.01	
Ammonium	NH ₄ "	<0.05	<0.01
Nitrit	NO ₂ "	<0.01	<0.01
Nitrat	NO ₃ "	1.1	2.6
Sulfat	SO ₄ "	10	49
Bikarbonat	HCO ₃ "	61	108
Klorid	Cl "	15	7
Kalcium	Ca "	12	69
Magnesium	Mg "	3.6	17
Totalhårdhet	°dH	2.5	9.9
Kolsyra, marmoraggressiv ber	CO ₂ mg/l	20	
Kiselsyra	SiO ₂ "	9.2	

A: $TDS \approx 0.6 \lambda = 102 \text{ mg/l}$

$$(pK_2' - pK_S') = 2.30$$

$$pCa = -\log \frac{12}{40000} = 3.5$$

$$pAlk \approx -\log \frac{61}{61000} = 3.0$$

$$pH_S = 2.3 + 3.5 + 3.0 = 8.8$$

$$RSI = 2 \cdot 8.8 - 6.8 = 10.8$$

B: $TDS \ 0.6 \lambda = 167 \text{ mg/l}$

$$(pK_2' - pK_S') = 2.35$$

$$pCa = -\log \frac{69}{40000} = 2.8$$

$$pAlk \approx -\log \frac{108}{61000} = 2.8$$

$$pH_S = 2.35 + 2.8 + 2.8 = 7.95$$

$$RSI = 2 \cdot 7.9 - 7.1 = 8.8$$

Igensättning av järn och mangan

Lösligheten hos järn och mangan är beroende både av pH och vattnets oxidationsstadium. Vattnets oxidationsstadium bestäms av den sk redoxpotentialen, Eh, som är ett mått på den energi som krävs för att uppta eller avge elektroner från joner i en given kemisk miljö. I naturliga vatten är syrehalten ofta den primära faktorn som styr Eh, men även andra oxidationsmedel, som nitrat, NO_3^- , och sulfat, SO_4^{2-} , har betydelse vid låga syrehalter.

I fig 5.19 visas ett stabilitetsdiagram för järn vid olika oxidationsstadiet i vatten.

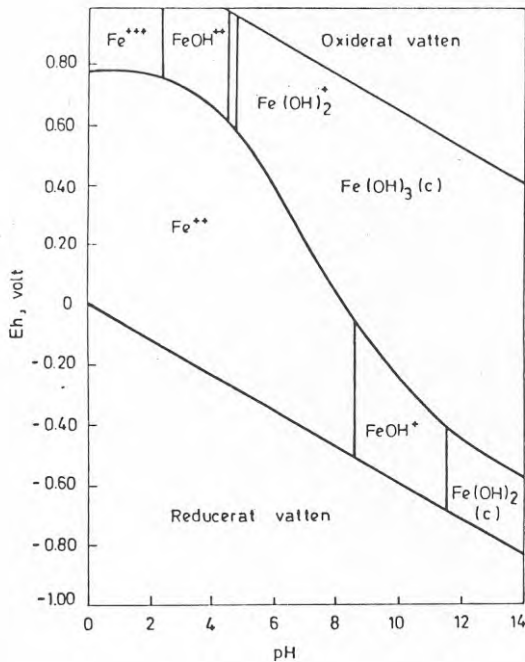
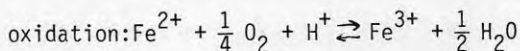


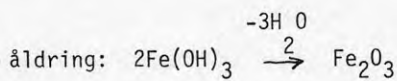
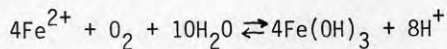
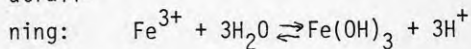
Fig 5.19 Stabilitetsfält för ferri-ferro systemet (Hem 1962).

Man finner att vid de pH-värden som normalt råder i grundvatten, 5-9, bör den dominerande reaktionen vara en övergång mellan tvåvärt järn i lösning och järnhydroxid, $\text{Fe}(\text{OH})_3$.

Järnhydroxid bildas i flera steg och är i sig ej någon stabil förening utan åldras direkt genom att avge vatten varvid järnoxider som är hårda bildas. Förloppet kan åskådliggöras med följande reaktioner.



utfäll-



Reaktionshastigheten beror av pH enligt:

pH	Reaktionshastighet $\frac{d(\text{Fe}^{2+})}{dt}$ (mg $\text{Fe}^{2+}/\text{l} \cdot \text{tim}$)	
	$(\text{Fe}^{2+}) = 55 \frac{\text{mg}}{\text{l}}$ $p\text{O}_2 = 0.1 \text{ atm}$	$(\text{Fe}^{2+}) = 5,5 \frac{\text{mg}}{\text{l}}$ $p\text{O}_2 = 0.1 \text{ atm}$
4	- 0.00027	- 0.000027
5	- 0.027	- 0.0027
6	- 2.7	- 0.27
6.5	- 27.0	- 2.7
7	- 270.0	- 27.0
8	-27000	-2700

$$\frac{d(\text{Fe}^{2+})}{dt} = -k \cdot (\text{Fe}^{2+}) \cdot p_{\text{O}_2} \cdot (\text{OH}^-)^2$$

$$k = 8.0 \cdot 10^{13} \text{ mol}^{-2} \text{ atm}^{-1} \text{ min}^{-1}$$

Vid en järnhalt kring 5 mg/l sker således en mycket långsam kemisk oxidation vid pH <6. Järnbakterier kan då verka som katalysator vid oxidation och utfällning av järn.

Det är en mycket heterogen grupp av mikroorganismer som kallas järnbakterier. Gemensamt har de att de oxiderar Fe^{2+} till Fe^{3+} . En del utnyttjar den energi som frigörs vid oxidationen, andra kan leva på oorganiskt material. Flera av bakterierna trivs vid pH och syrehalter som är lägre än de förhållanden som gynnar kemisk utfällning. Slammet som bildas vid oxidationen hårdnar med tiden, precis som vid kemisk utfällning. Under de hårda krustorna uppstår anaeroba förhållanden, där sulfat-reducerande bakterier kan leva. Dessa bakterier orsakar korrosion på metaller.

Gränsen för vid vilken järnhalt utfällning av betydelse kan ske eller inte, kan ej anges då några sådana ej finns.

Inom lantbruket förekommer riktvärden för utfällning av järn i dräneringar t ex Maslov et al (1975).

ingen risk för igensättning	<3 mg Fe/l
liten risk för igensättning	3-5
moderat risk för igensättning	5-8
stor risk för igensättning	8-14
mycket stor risk för igensättning	>14

Det bör dock påpekas att igensättningar i ledningssystem har observerats då järnhalten i vattnet varit så låg som 0.2 mg/l, Knudsen (1940).

Om en igensättning sker beror som tidigare nämnts förutom på järnhalten även på förekomst av järnbakterier, pH och Eh.

Uppmärksamheten bör i första hand vara riktad mot den förändring som vattnet kan bli utsatt för snarare än dess tillstånd i det "orörda" grundvattenmagasinet. Dvs

- Kommer pH att förändras under uppumpningen?
- Kommer Eh att förändras?
- Kommer andra främmande vatten att dras till brunnen som kan misstänkas vara oxiderat, t ex från en intilliggande sjö?

Ju högre järnhalt desto kraftigare blir sedan reaktionen.

Vad som ovan skrivits om järn gäller i hög grad även för mangan. På samma sätt som för järn kan ett stabilitetsdiagram för olika pH och Eh upprättas. Man finner då att den dominerande reaktionen är en övergång mellan tvåvärd mangan i lösning och brunsten, MnO_2 . Även denna reaktion är reversibel och medför att tidigare utfälld mangan kan gå i lösning vid en förändring av Eh eller pH.

Sammanfattningsvis kan man säga att korrosion av ett material beror av vattnets sammansättning och materialet. Korrosionsprodukter kan efter frigörandet från modermaterialet avsättas och skapa en igensättning. Igensättning beror däremot mestadels på vattnets sammansättning och härur bildade utfällningar. Under en utfällning kan korrosion ske p g a luftceller eller sulfatreducerande bakterier. Kalkutfällningar kan i bästa fall skydda mot korrosion.

5.4 Igensättning av infiltrationsbrunnar

Infiltrationsbrunnar skiljer sig från vanliga uttagsbrunnar genom att det ofta är två olika vatten som möts i eller intill brunnen. Igensättning i jordborrade infiltrationsbrunnar sker vanligtvis i brunnen närmsta omgivning eller i brunnsfiltret. För brunnar med konstgjort grusfilter utgör gränssytan grusfilter

naturlig formation en avsättningsyta för igensättande produkter som tillförs med infiltrationsvatten. Ett grusfilter bör därför aldrig utföras tjockare än vad som kan nås vid rensningsarbetena, dvs ca 7-15 cm. I bergborrade brunnar kan igensättning ske direkt på borrhålets väggar eller i sprickor.

Igensättning av infiltrationsbrunnar kan sägas bero av följande huvudfaktorer:

- suspenderat material i infiltrationsvattnet filtreras från i brunnens omgivning.
- luft och andra gaser i infiltrationsvattnet och tillförda i brunnen, frigörs och avsätts i brunnens närhet.
- kemiska reaktioner mellan infiltrations- och grundvattnet orsakar utfällningar som sätter igen brunnfiltret eller formationen.
- urlakning medför att lerfraktionen (leraggregaten) sväller och dispergerar.
- strukturförändringar av akviferen på grund av för höga vattenhastigheter i brunnens närhet.

Suspenderat material

Som infiltrationsvatten utnyttjas i huvudsak två olika typer av vatten beroende på syftet med infiltrationen. Vid infiltration för försörjningsändamål används uteslutande ytvatten från t ex en sjö. Ett sådant vatten har vanligtvis en hög grumlighet och innehåller suspenderat material vida överstigande den mängd som kan accepteras vid infiltration. Vattnet bör därför filtreras på något vis.

Då konstgjord infiltration utförs till begränsade lågpermeabla jordlager för att höja grundvattentrycket utnyttjas vanligtvis kommunalt försörjningsvatten eller grundvatten från en dränerande anläggning. Dessa vatten får anses som rena ur konsumtions-synpunkt men är inte tillräckligt fria från suspenderat material för att infiltration skall kunna göras utan att igensättning sker. Halten suspenderat material är vanligtvis låg (runt ca 1 mg/l) men partiklarna har vanligtvis sådana egenskaper att när de bildar en filterkaka blir dess permeabilitet mycket liten (runt ca 10^{-10} m/s). Detta får till följd att permeabilitetsnedsättningen vid en fullt utbildad filterkaka blir betydande.

För att undvika igensättning av suspenderat material bör man alltid behandla infiltrationsvattnet genom filtrering. Det bekvämaste handhavandet av filter vid små vattenmängder erhålls med utbytbara filterpatroner (bomull, glasfiber) men även sandfilter kan utnyttjas. Lämplig porstorlek på patronen är 5 μ m, men kan varieras från fall till fall.

Luft - gaser

Om gaser finns i infiltrationsvattnet över de mängder som kan lösas vid aktuellt tryck och temperatur i akviferen frigörs dessa och avsätts i formationens porer. Dessa frigjorda gas-bubblor verkar som partiklar och minskar den tillgängliga genomströmningsarean.

Gaser finns alltid i vatten men mängden varierar beroende på vattnets härkomst. I samband med infiltrationen kan även luft tillföras vattnet t ex genom att vattnet faller fritt ned i brunnen.

Vattnets innehåll av gaser analyseras vanligtvis genom dess syrehalt varefter omräkning sker till halten luft. Andra gaser kan analyseras om så erfordras.

Om infiltrationsvattnet innehåller högre halter luft än vad som kan lösas vid det tryck och den temperatur som råder i akviferen måste vattnet avluftas. Detta utförs enklast via en automatisk avluftningsventil vid så lågt tryck som möjligt eller med vacuumpump.

Kemiska reaktioner

De vanligaste kemiska reaktioner som kan inträffa vid infiltration är utfällning av järnhydroxid och kalciumkarbonat.

Järnhydroxid bildas vid kontakt mellan ett järnrikt (grundvatten) och ett syrerikt (infiltrationsvattnet) vatten. Både kommunala försörjningsvatten och inläckande grundvatten är vanligtvis syrerika och orsakar därför utfällning av järnhydroxid vid kontakt med grundvatten om detta är järnhaltigt. Problem med igensättning bör dock vara begränsande vid järnhalter mindre än ett milligram.

Kalciumkarbonat fälls ut vid kontakt mellan två vatten där det ena vattnet är mättat avseende kalcium och det andra vattnet har ett pH som överstiger jämvikts-pH. Jämviktsförhållandet beskrivs t ex med RSI.

Ett inläckande grundvatten kan vara i relativt bättre jämvikt med grundvattnet vid infiltrationsbrunnen än vad ett försörjningsvatten är. Detta behöver dock inte vara en regel. Ett grundvatten som läcker in i en cementtätad tunnel har t ex luftats vid kontakt med atmosfären i tunneln varvid järn kan ha fällts ut och avsatts på tunnelväggen. Dessutom kan kalcium lösas upp vid kontakten med cementtätningen om grundvattnet är aggressivt. Detta innebär att läckagevattnet får högre syrehalt, lägre järnhalt, högre kalciumhalt samt högre vätekarbonathalt än det ursprungliga grundvattnet.

Igensättning av utfällningar kan rensas bort om de skett i brunnens närhet. En kombination av mekanisk och kemisk rensning torde vara mest effektivt.

Urlakning

Infiltration genom brunnar som grundvattentryckhöjande åtgärd utförs i de områden av landet som en gång legat under havet. Djupa akviferer i dessa områden kan därför än idag ha salt grundvatten.

Lerpartiklar i salt miljö är fast bundna till varandra i aggregat. Om porvattnet runt leran lakas ur kommer partiklarna att repellera från varandra för att slutligen helt frigöras från aggregaten. Partiklarna kan härvid transporteras med vattenflödet och avsättas som suspenderat material.

Infiltrationsvattnet bör därför innehålla motsvarande sammansättning av positiva joner som grundvattnet. Ju fler flervärda positiva joner desto bättre är förutsättningarna för aggregatbildning.

Igensättning sker även då formationen innehåller en mycket låg halt av lerfraktionen (endast någon procent). Denna typ av igensättning kan vara svår att rensa bort och måste därför undvikas.

Mikrobiell aktivitet

Ytvatten innehåller alltid mikroorganismer, som med den näring som finns i vattnet kan orsaka växtlighet. Speciellt bör detta uppmärksammas under sommarhalvåret.

Försörjningsvatten som transporteras i gamla gjutjärnsledningar innehåller vanligtvis järnbakterier. Dessa bakterier producerar järnhydroxid vid närvaro av järn och koldioxid. Även manganbakterier kan förekomma i sådana ledningar. En uppfattning om

problemets storlek kan fås genom att förhöra sig om driftsproblem på ledningsnätet i infiltrationsbrunnens närhet.

Genom att hålla ett kloröverskott på infiltrationsvattnet kan problemet minimeras. Igensättningen kan även rensas bort med kemiska metoder.

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

Bedömning av en igensättning

För att bedöma storleken av en eventuell igensättning måste omfattande kemisk-fysikaliska analyser göras på infiltrationsvattnet och det ursprungliga grundvattnet. Provtagning av infiltrationsvattnet måste göras vid infiltrationsplatsen då sammansättningen på vattnet kan variera kraftigt på olika platser på ett ledningsnät.

Många typer av igensättning kan rensas bort med mekaniska eller kemiska metoder. En rensning måste för att den skall vara effektiv utföras innan igensättningen blivit för stor.

Brunnen utformning är av stor betydelse för hur hårt en igensättning påverkar dess funktion. En infiltrationsbrunn skall därför alltid dimensioneras och utföras efter samma principer som en uttagsbrunn.

En mer detaljerad redovisning av igensättningsproblematiken erhålls av Andersson et al 1980.

De allra flesta brunnsborrningar som utförs i Sverige är s k produktionsborrningar på vinst och förlust. Beställaren är vanligen en enskild person som nöjer sig om brunnen ger några tiotal liter per minut. Det görs i genomsnitt ca 10 000 sådana brunnar per år och det är dessa som är brunnsborrharens huvudsakliga levebröd.

Det finns emellertid andra beställargrupper som önskar sig brunnar med betydligt större kapacitet, exempelvis en kommun som baserar sin vattenförsörjning på grundvatten, en industri som använder grundvatten som process- eller kylvatten eller ett jordbruk som använder grundvatten för bevattning. Sådana brunnsägare vill oftast ha en central brunnsanläggning med högsta tänkbara brunnskapacitet.

Det kanske inte byggs mer än några hundra sådana brunnar per år, men de som anläggs representerar ett stort ekonomiskt värde.

Den stora investeringen motiverar oftast att själva brunnsborrningen föregås av en eller flera undersökningsborrningar. Detta dels för att minimera riskmomentet av investeringen och dels för att införskaffa ett geologiskt, tekniskt och ekonomiskt underlag så att den brunn som skall anläggas får en optimal utformning.

6.1 Allmän bakgrund

En undersökningsborrning går främst ut på att provta och dokumentera jord- och berglagren. Provernas kvalitet och möjligheterna till annan dokumentation än provtagning varierar med dels borrhmetod och dels med de kvaliteter som borrhpersonalen besitter.

För den som beställer och leder en undersökningsborrning är det av största vikt att känna till vilken borrhmetod som är lämpligast för varje borrhningstillfälle, att kunna utforma ett realistiskt

och ur borrhningsteknisk synpunkt godtagbart borrhningsprogram samt att kunna samråda med borrhmanskabet och improvisera allt eftersom problem uppstår.

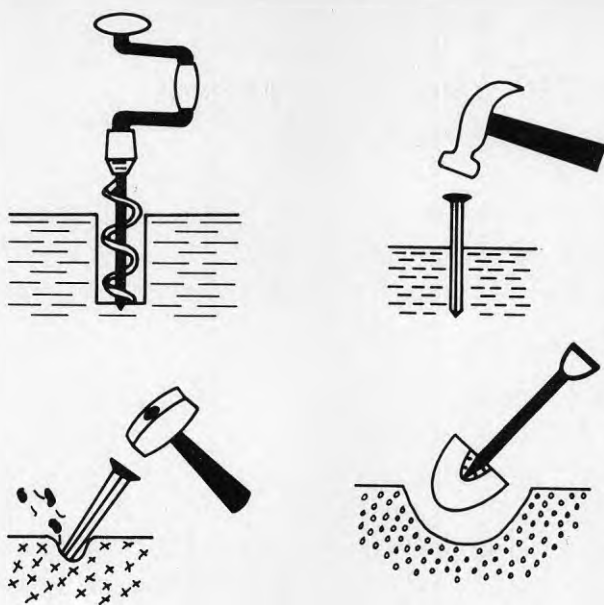
Det sistnämnda är särskilt viktigt eftersom det i praktiken är borrhmanskabets yrkesskicklighet och vilja att utföra en borrhning efter givna föresatser som är helt avgörande för det slutliga resultatet.

Resultatet av undersökningsborrningen ligger sedan till grund för de entreprenadhandlingar som behövs då produktionsbrunnen skall upphandlas. Häri ingår normalt en beskrivning av hur brunnen skall se ut då den är färdig, se vidare i kapitel 8.

Det är självfallet av största vikt att ingående känna till de olika håltagningsmetoder som står till buds då man planerar och projekterar en borrhning oavsett det rör sig om undersöknings- eller produktionsborrning. Vi skall därför inledningsvis betrakta borrhandet ur vetenskaplig synpunkt och se utifrån vilka grunder metoderna kan klassificeras och beskrivas. Därefter skall vi titta närmare på de borrhmetoder och de provtagningsmetoder som normalt kommer till användning i Sverige vid borrhning för grundvattentäkter.

6.2 Klassificering av borrhmetoder

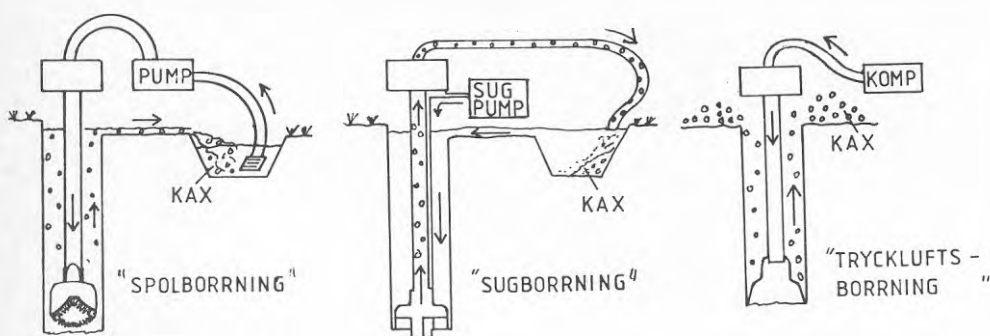
För att beskriva en viss borrhmetod eller en viss teknik att borra användes en rad olika begrepp. De flesta av dessa ger en verbal och bildlig beskrivning på det sätt varpå håltagningen sker. Några exempel på detta är stöt-, rotations-, slag-, hammar-, vibrations-, skär- och skruvborrning samt rördrivning. I princip är dessa sätt att göra hål analoga med mer vardagliga håltagningar vilka illustreras i figur 6.1.



Figur 6.1 Några vardagliga håltagningsmetoder (O. Andersson 1981).

Man "stöter", "roterar", "slår", "hamrar", "vibrerar", "skär", "skruvar" respektive "driver" sig ner genom jord- och berglagren.

Andra begrepp berättar exempelvis om sättet varpå upptransporten av det genomborrade materialet, "borrkaxet" sker. Man talar exempelvis om spol-, sug- och tryckluftsborrning, man "spolar", "suger" respektive "blåser" upp borrkaxet, se figur 6.2.



Figur 6.2 Några borrhningsbegrepp baserat på sättet varpå kaxet upptransporteras.

Ett par exempel på begrepp som är förknippat med ett specifikt ändamål är pall- och kärnborrning, nämligen att borra för att spränga ut pallar i stenbrott respektive ta kärnprover ur jord- och berglager.

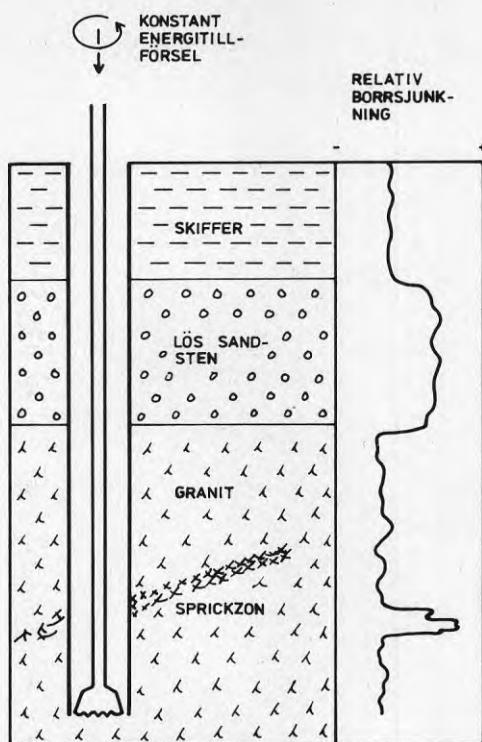
Ytterligare begreppsexempel finns, men de är onödiga för att visa att de termer och begrepp som användes för att beskriva borrhningsmetoderna är av olika dignitet.

För att kunna jämföra olika bormetoder måste därför ett klassificeringssystem tillgripas.

Vid nästan all konventionell borrning sker sönderdelning genom mekanisk inducering av spänningar så att brott uppstår i berg och uppluckring av jord.

Den energi eller det arbete som åtgår för sönderdelningen är dels en funktion av jord- eller bergartens borrbarhet och dels av bormaskinens (-metodens) totala verkningsgrad i en given situation.

Med borrbarhet menas, något förenklat, bergets eller jordens förmåga till sönderdelning, ungefär såsom figur 6.3 visar.



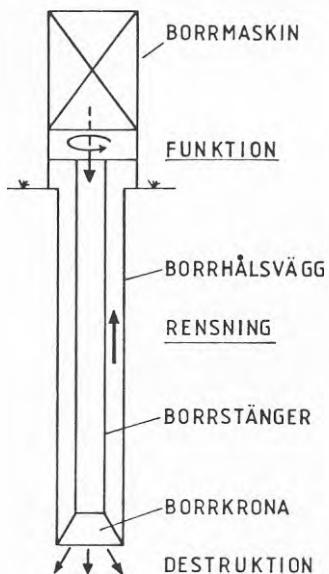
Figur 6.3 Relativ borrarbarhet kopplad till bergartens egenskaper (O. Andersson 1981).

Det är till stor del just borrarbarhetens variation med olika jord- och bergmaterial som skapat utveckling av olika bormetoder.

Figur 6.4 visar de tre betraktelsegrunder man kan använda för att klassificera en konventionell bormetod, nämligen

- sättet varpå formationen sönderdelas (destruktionsprincipen)
- med vilka mekaniska moment nödvändig energi tillföres borkronan (funktionsprincipen)

- sättet varpå sönderdelat material transporters upp till markytan (rensingsprincipen).



Figur 6.4 Grunder för klassificering (O. Andersson 1981).

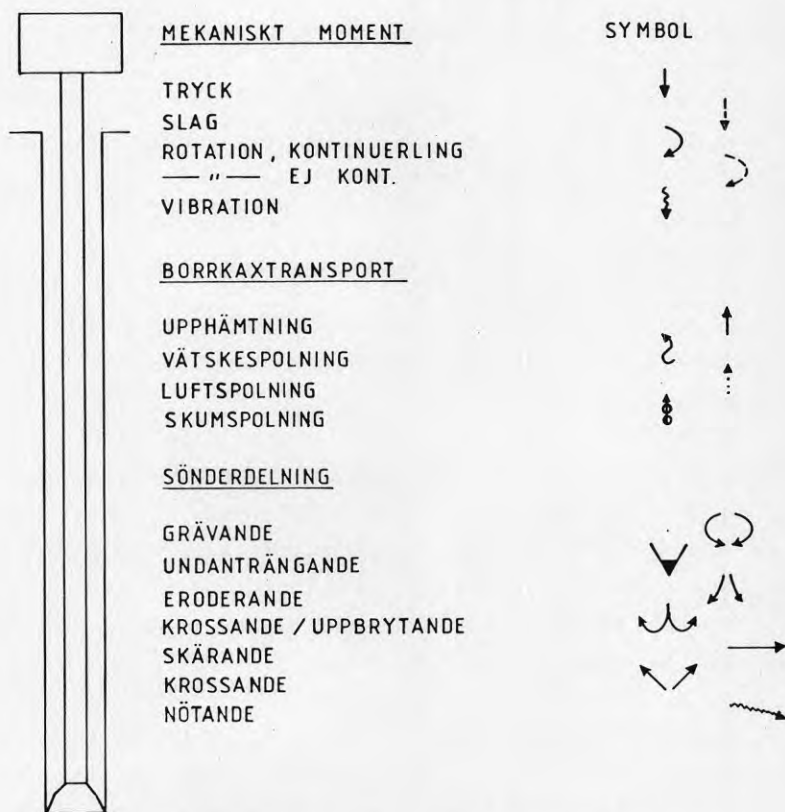
Destruktionen eller sönderdelningen, vilken är den grundläggande indelningsprincipen, kan vara antingen krossande, nötande, krossande/uppbrytande, skärande, undanträngande eller grävande. Varje destruktionsprincip kräver sin typ av borrhålskrona, vilket kommer att framgå längre fram.

De olika sönderdelningsprocesserna nere i borrhålet fordrar olika utformning och prestanda hos bormaskinen. Det är ju bormaskinens funktion(er) som gör sönderdelningen optimal. De mekaniska moment som från maskinen och via borrhålets rör överförs till borrhålskronan kan antingen vara tryckande, slående, roterande, vibrerande eller kombination av dessa, t ex slående/roterande.

Det genomborrade materialet slutligen, det s k borrhålskaxet, kan fås till markytan antingen genom upphämtning i kanna, tub eller

liknande, eller också genom något spolningsförfarande. Som transportmedel vid spolning användes vätska, luft eller skum.

Genom att använda dessa tre klassificeringsgrunder kan vilken konventionell borrar metod som helst ges en beskrivning. Detta kan göras antingen med de ovan understrukna orden i kombination eller ännu enklare med symboliska tecken såsom i figur 6.5.



Figur 6.5 System för borraringsmetodisk klassificering verbalt och teckensymboliskt (O. Andersson 1981).

6.3 Beskrivning av de vanligaste borrar metoderna

De borrar metoder som tillämpas vid undersökningsborrningar är på något undantag när desamma som användes vid produktionsborrning.

Skillnaden består främst i att undersökningsborrningen försiggår i mindre dimensioner och med ett speciellt program för provtagning och annan registrering. Det är emellertid inte ovanligt att ett undersökningshål, om det givit ett gynnsamt utfall, kompletteras med brunnsfilter, foderrör, brunsöverbyggnad, pump etc och blir en produktionsbrunn. Det finns således ingen anledning att ur borrhningsteknisk synpunkt särskilja undersökningsborrning från produktionsborrning.

Den beskrivning som kommer nedan syftar till att ge en allmän uppfattning om olika utrustningar, borrhningsmetoder, borrhningstekniker mm som kan vara av fundamentalt intresse vid planering av såväl undersöknings- som produktionsborrning.

6.3.1 Linstötborrning

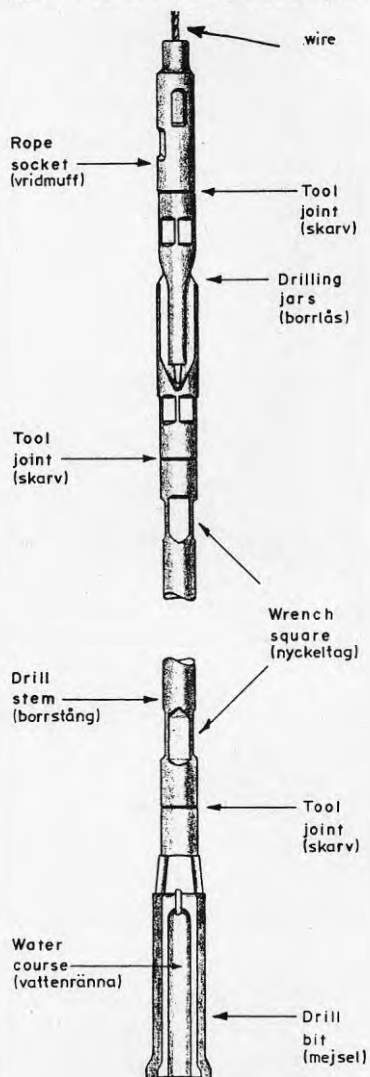
Från att ha varit den klart dominerande brunnsborrhningssmetoden under 1900-talet har linstötborrhningen under den sista 10-årsperioden gått starkt tillbaka.

Det är annars en metod med anor långt bak i tiden. Metoden är sannolikt utvecklad i Kina där man för mer än 2500 år sedan borrhade hål för saltutvinning, hål som var hundratal meter djupa. Oljeepokens inledning ledde sedan till en utveckling av borrhutrustningarnas storlek så att man i slutet av 1800-talet kunde göra oljebrunnar som var mer än tusen meter djupa.

Djuprekordet är från 1953 då en 3397 m djup brunn färdigställdes i trakten av New York, USA. I Sverige är rekordet 508 m. Det gjordes som en förborrning till ett saltprospekteringshål på Falsterbonäset i Skåne 1954.

Borrhmetoden går ut på att lyfta och släppa en serie verktyg som sitter på en vajer. En mejsel som är belägen längst ned slår mot borrhålsbotten och krossar ned jord- eller bergarten. Ovanför mejseln sitter i nämnd ordning först en "tungstång", en "stötdämpare" och en "vridmuff". Borrningen utförs med sträckt vajer.

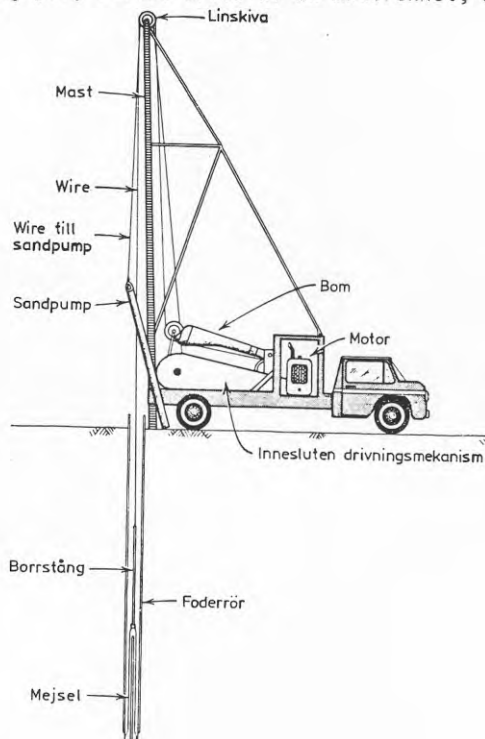
Mest spänd är den när mejseln slår mot botten. På grund av linans elasticitet och "stötdämparen" fås en viss "gummibands-effekt" som gör att den strax efter slaget återgår till utgångsläget. Det återgående rörelsen påverkar "vridmuffen" så att mejseln vrider sig ett par grader för varje slag. På så sätt kommer mejselleggen att träffa ny bottenyta varje gång.



Figur 6.6 Nere-i-hålet-utrustning vid linstötbörning (Johanson Div 1975).

De linstötmaskiner som finns på marknaden idag är i stort sett lika i utformning, det är bra storleken som skiljer. De flesta ligger i 2-4-tonsklassen och sitter monterade på 2-axlat dragbart chassi. Endast ett fåtal sitter på terränggående fordon.

På de flesta linstötutrustningar löper vajern från hålet upp över en linskiva högst uppe på masten. Därifrån går vajern ner genom ett annat hjul som sitter i ändan av en bom. Bommen fås att svänga upp och ned med hjälp av en styrarm som är ansluten till ett svänghjul, vilket drivs av en motorenhet, se figur 6.7.



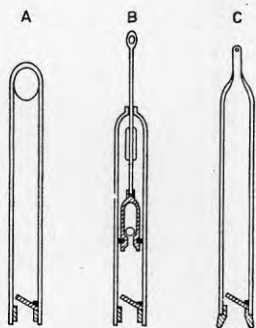
Figur 6.7 Linstötutrustning (Andersson/Gustafson 1980).

Vajern sitter upplindad runt en trumma. Genom att två eller flera anslutningspunkter för styrarmen finns på bommen kan slaglängden varieras. Vanligen är slaglängden ca en halv meter. Slaghastigheten ligger mellan 20 och 40 slag per minut. Borrverk-

tygens vikt varierar med storlek på utrustning från 500 till 2000 kg.

Då man borrar genom lösa jord- eller bergformationer måste ett foderrör drivas samtidigt som borrningen fortskrider, detta för att inte hålet skall rasa eller flyta igen. I vissa lösa jordmaterial, exempelvis sand, drivs foderröret först, varefter materialet borraras eller spolras ur. I andra material, exempelvis morän, borraras hålet först och då bitvis, 1-3 m åt gången, innan foderröret drivas till hålbotten och rensas ur. Borrning med foderrör genom jordlager och lösa berglager brukar benämnas rörborrning.

Det genomborrade materialet, borrkaxet, hämtas upp med en s k sandpump. Denna består i princip av ett öppet rör, vars botten genom en platta eller en kula fungerar som en ordinär backventil. Figur 6.8 visar några sandpumpstyper.



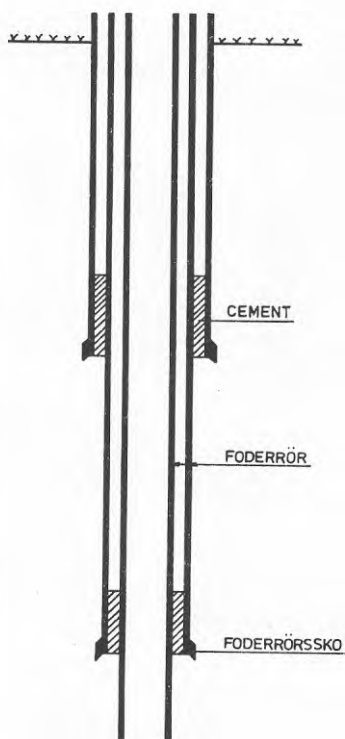
Figur 6.8 Några sandpumpar. Till vänster en kolvpump. Till höger en enkel ventilpump (Huisman 1972).

Materialet tillåts således att tränga in i röret då det släpps ned i hålet. Då det lyfts sluts ventilen och kaxet kan hämtas upp till markytan. Vid borrning i torra formationer, exempelvis över grundvattennivån, måste vatten tillföras hålet för att sandpumpen skall fungera.

Foderröret är i sin nederända vanligen förstärkt med en foderrörssko. Denna har en något större diameter än själva foderröret och är utformad med egg som är konisk inåt. Foderröret vilar på en faskant inuti skon.

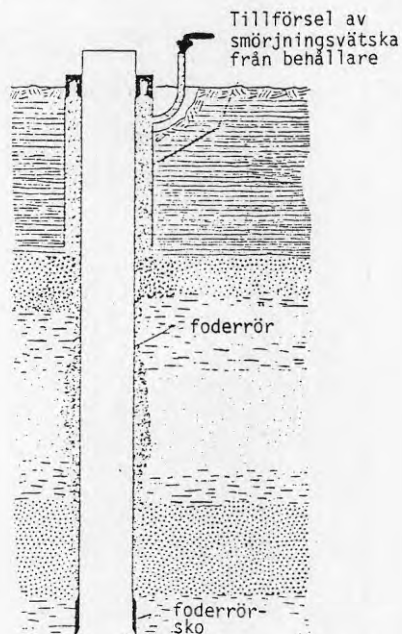
Foderröret slås ned med samma mekanism som vid borrning. De tunga verktygen låses med klämmor som sedan slår på foderröret.

Vid borrning genom jordlager kommer de vibrationer som löper genom marken vid varje slag att orsaka kollaps runt foderröret. I själva verket fås en ordentlig packning, vilket gör att friktionen mellan foderrör och formation successivt ökar. Till slut är fortsatt drivning omöjlig. När detta inträffar är enda möjligheten att fortsätta borrningen med en mindre dimension. Detta kallas teleskopförfarande, se figur 6.9.



Figur 6.9 Foderrör i teleskoputförande (O. Andersson 1981).

Genom att bl a smörja borrhålsväggen med skum, bentonit, eller liknande kan varje teleskopdel göras längre. Figur 6.10 beskriver ett liknande förfarande, där också ett hydrostatiskt övertryck upprätthålls i utrymmet mellan borrhålsvägg och foderrör.

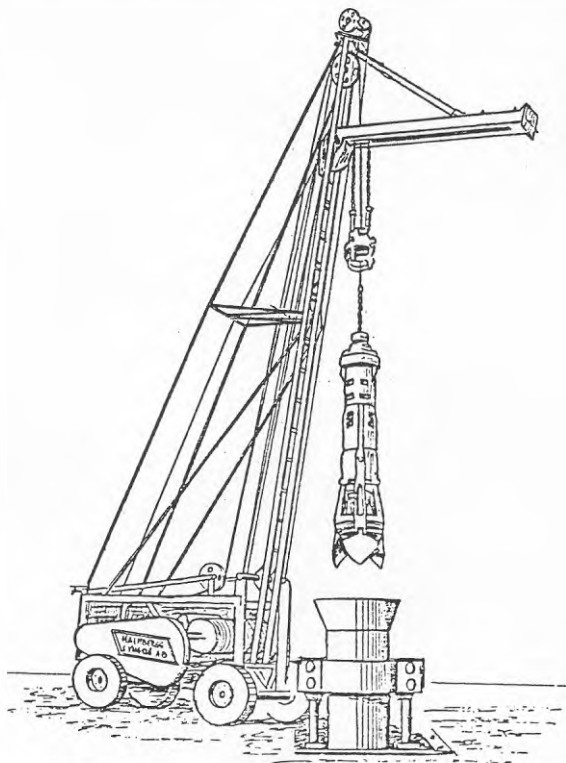


Figur 6.10 Foderrörsdrivning med smörjning (Church 1960).

Vid de tillfällen man sätter ett filter - med eller utan grusning - inuti foderröret med avsikt att färdigställa en grusfilterbrunn, se kapitel 8, exempelvis figur 8.15, måste foderröret åter dras upp. Detta sker vanligen med hjälp av domkraft.

Då borrning görs i mycket stora dimensioner kan en s k polygrip-skopa användas, se figur 6.11. Skopan består av ett antal skovelblad. Dessa hålls öppna när skopan med egen tyngd fritt får falla ned i borrhålet. Skovelbladen trycks härvid ner i den lösa formationen och när vajern sedan sträcks slutet bladen mot varandra och jordmaterialet stängs inne och kan tas upp till markytan. Detta borrhingsförfarande är emellertid relativt ovan-

ligt i Sverige. Ungeför 5% av brunnborrarna uppger sig använda polygripskopa.

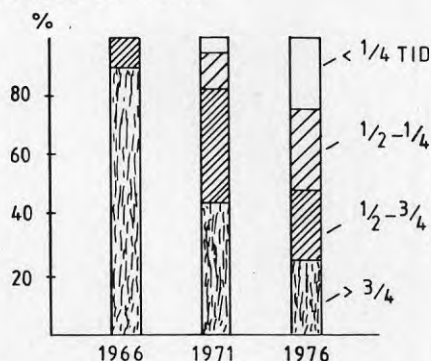


Figur 6.11 Borrning med polygripskopa (Malmergs i Yngsjö AB u.å.).

Som tidigare angivits användes linstötborrning i allt mindre omfattning. Orsakerna härtill är flera. Mest bidragande är dock att linstötmaskinerna ersatts av mer snabbborrande och effektivare borrhingsmetoder som hammar- och rotationsborrning.

Samtidigt är emellertid linstötmaskinen den mest universella borrhustrustningen. Den kan med andra ord användas i nästan alla geologiska formationer. Nackdelen, jämfört med moderna specialiserade metoder, är främst den långsamma borrhingshastigheten, särskilt på större djup.

Metoden är dock fortfarande konkurrenskraftig, ibland också borrhningstekniskt överlägsen, bl a när det gäller att borra och anlägga grunda filterbrunnar i grovkorniga lösa jordlager, exempelvis i stenigt åsmaterial. Detta förklarar också varför det trots en markant nedgång i maskinernas beläggning ändå finns ett betydande antal kvar, se figur 6.12 och 6.14. Medel djupet per borrhningstillfälle 1976 var 32 m.

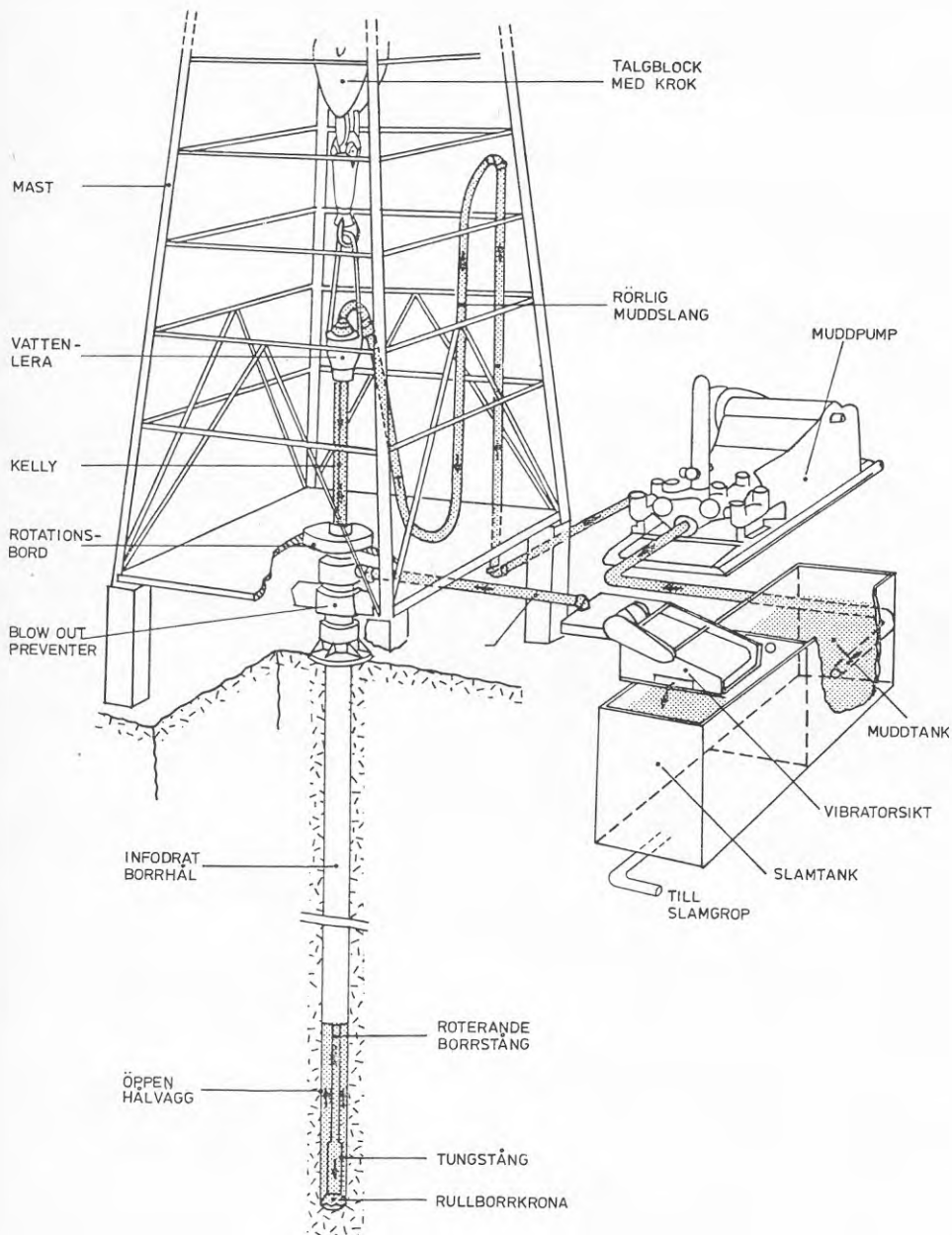


Figur 6.12 Linstötutrustningarnas beläggning 1966-1976 (O. Andersson 1981).

6.3.2 Rotationsborrning med direktspolning

Även rotationsborrning, dvs borrhning med kontinuerligt roterande borrhkrona, har rötter långt bak i tiden. De äldsta spåren av sådan borrhning härstammar från den tid då man byggde pyramider i Egypten. Bevarade borrhållsväggar i stenbrotten, varifrån byggstenarna till pyramiderna togs, uppvisar en räfflad struktur lik den som fås vid roterande borrhning med nutida verktyg.

Det var just som kärnborrningsmetod inom gruvindustrin som metoden i modern tid först praktiserades. På mitten av 1800-talet övertogs den av oljeindustrin, som bytte ut kärnborrhkronan mot olika typer av kronor för nedkrossning. Idag användes s k rullborrhkronor och borrhkaxet tas till ytan med hjälp av specialkomponerad spolvätska. Figur 6.13 visar ett oljeborrhrtorn.

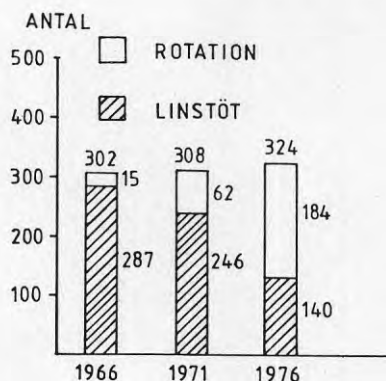


Figur 6.13 Utrustning för oljeborrning (O. Andersson 1982).

Det djupaste hål som borrats med konventionell rotationsborrningsteknik är 9583 m djupt. Rekordet är satt 1974 i Oklahoma, USA. Det djupaste svenska hålet är 2608 m, borrarat 1972 av Oljeprospektering AB.

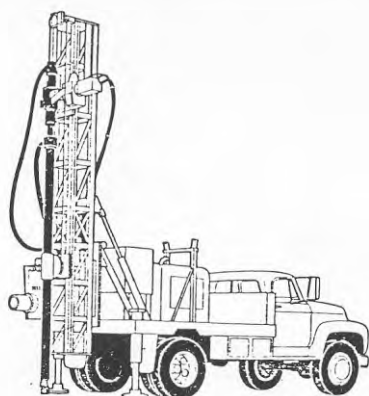
Inom brunnsborrningen har man från och med sekelskiftet anammat oljeborrtekniken, men med mindre utrustningar. Den metod som hämtats från oljeborrningen kallas rotationsborrning med direktspolning.

Rotationsborrtrrustningar bland brunnsborrare har under de sista 10-15 åren kraftigt ökat i antal i Sverige, se figur 6.14, huvudsakligen på bekostnad av linstötutrustningar. Av brunnsborrarnas totalt ca 180 rotationsborrtrrustningar är det ca 30 som användes eller kan användas för borrning med direktspolning.



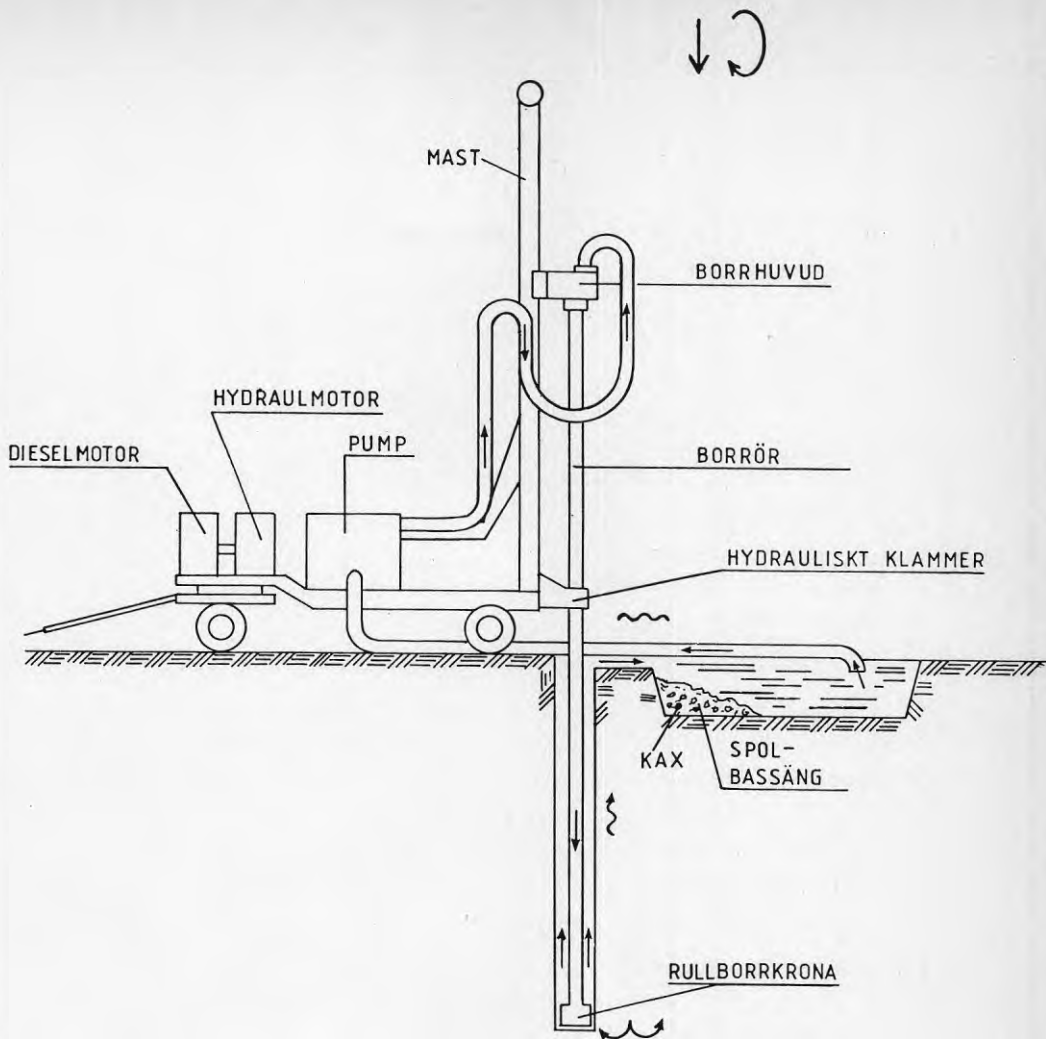
Figur 6.14 Utrustningsparkens förändring 1966-1976 (O. Andersson 1981).

Utrustningarna varierar något i utformning men figur 6.15 ger en viss illustration av det principiella utseendet. Storleken som ofta mäts i maximalt borrhjup vid viss dimension skiljer sig markant. De flesta utrustningar är dimensionerade för borrhjup mellan 100 och 300 m, enstaka finns för borrning till ca 1000 m djup. I princip är det maskinens lyftkapacitet som blir avgörande för håldjupet.



Figur 6.15 Mobil rigg för rotationsborrning (Atlas Copco 1977).

Den genomsnittliga utrustningens komponenter illustreras i figur 6.16. Själva borrrustningen är oftast monterad på en terränggående större jeep eller lastbil. På en fällbar mast sitter ett borrhuvud. Detta kan med hjälp av kedje- eller hydraulkolvsmatning löpa längs masten. I borrhuvudet sitter rotationsmomentet. Då upp- och nedrörelsen sker med hydraulkolvar är borrhuvudet utformat för genomgång av borrören. Det finns då antingen hydrauliska klämmor som nyper om det runda borrstålet inne i borrhuvudet eller också användes ett fyrkantigt borrör (Kelly) överst för att överföra vridmomentet till de runda borrören. På moderna riggar är nästan alla funktioner hydrauliska. Förutom ovannämnda förekommer hydrauliska stödben, klämmor och domkraft - domkraften normalt som sidoutrustning.

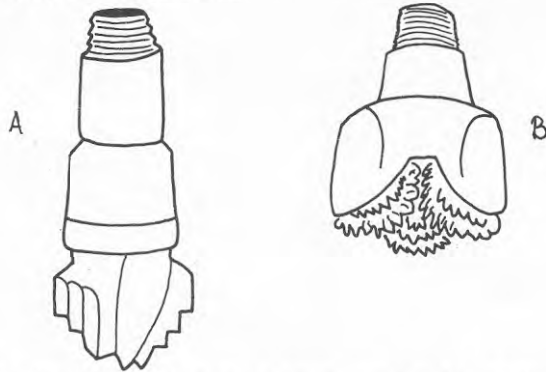


Figur 6.16 Rotationsborrning med direktspolning. Utrustningen är ofta kompletterad med lastbil eller jeep samt kompressor (O. Andersson 1974).

Även pumpen drivs ibland hydrauliskt. Det hydrauliska systemet har antingen en egen motor eller också, vilket är vanligast, användes jeep- eller lastbilsmotorn för att driva hydraulpumparna.

Själva borringen tillgår så att borrhålsbotten nöts eller bryts sönder av en roterande borrkrona. I block- och stenfria

jordlager användes lämpligen krona av skärande typ, annars en s k rullkrona, se figur 6.17.



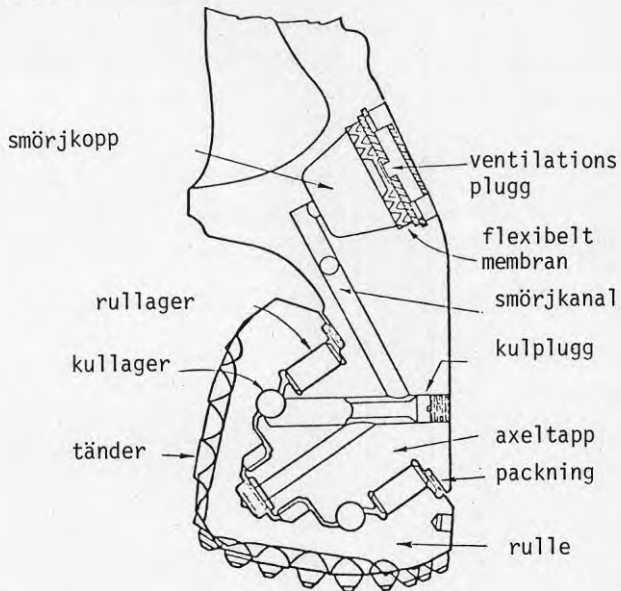
Figur 6.17 Borrkronor för rotationsborrning (O. Andersson 1981).
(A) Skärkrona för lösa formationer.
(B) Rullkrona för hårda formationer.

Rensningen av botten fås genom att, såsom figur 6.16 visar, kontinuerligt cirkulera en spolvätska, antingen bestående av rent vatten eller också vatten med tillsatser, s k mudd. Vätskan leds via en högtryckspump - vanligen en kolvpump - ned genom borrhörens under högt tryck. På borrkronan sitter munstycket som ger vätskan en hög hastighet - jettningeffekt - vilket gör att botthålsbotten hela tiden kan hållas ren från lossbrutna fragment. Vätskan för sedan kaxet upp från borrhålet i utrymmet mellan borrhålsväggen och de roterande borrhörens. Väl uppe vid markytan ledes spolvätskan först till en bassäng där kaxet får sedimentera och därefter till en annan bassäng varifrån det via pumpen återförs ned i borrhålet.

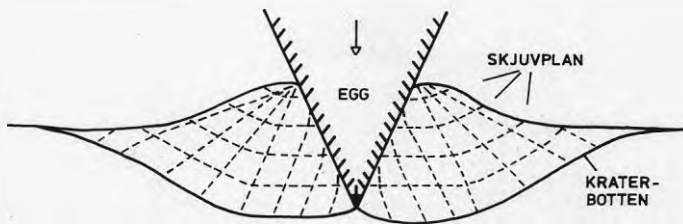
Under borringen kan både tryck på borrkronan (matningstryck), hastigheten varmed den roterar (rotationshastighet) och spolvätskans cirkulationshastighet (pumpslagsfrekvens) regleras. För att erhålla en effektiv borring måste i första hand dessa tre parametrar samverka i optimalt beroende till varandra.

Låt oss titta närmare på rullborrkronan, vilken är den som användes till 90-95% vid aktuell borrningsmetod. Figur 6.18 visar en

av de tre konformade och tandförsedda rullarna. Begränsande för en rullkronas dimension är framför allt rullagren. Om dessa görs för små tål de inte den tryckbelastning som erfordras för att trycka tänderna ned i formationen så som figur 6.19 visar. Nedträngningen medför en primärkrossning, som via tandens vridmoment övergår i en skjuvnings- och uppbrytningsprocess. I lös formation sker enbart uppluckring. Jetstråleffekten från munstycket gör sedan resten.



Figur 6.18 Del av rullborrkrona (Cunningham 1960).

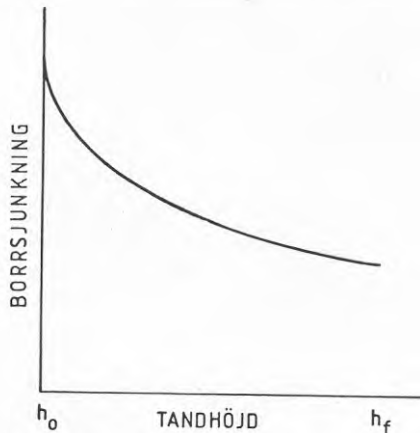


Figur 6.19 Krossnings- och skjuvningsprocessen då tanden trycks in och bryter i formationen (O. Andersson 1981).

Den minsta rullkrona som tillverkas för rotationsborrningsändamål bygger $3\frac{1}{2}$ " , de största 3-konade kronorna är ca 20". Rotationsborrning med direktspolning överstiger dock sällan 8-9" vid brunnsborrning. Den vanligaste dimensionen vid undersökningsborrning är $4\frac{1}{2}$ " och vid produktionsborrning 6-8".

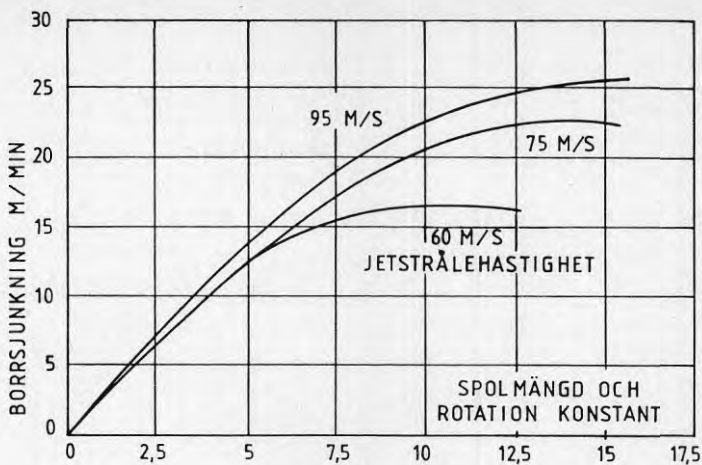
Längden för borrkronans tänder är en av de faktorer som påverkar borrningshastigheten. Val av tandhöjd görs utifrån de formationer som skall genomborras. Som tumregel gäller att mjuka formationer skall borras med långa smala tänder och hårda formationer med korta och knubbiga.

Under borringen nöts och trubbas tänderna successivt, se figur 6.20, vilket gör att kronan måste bytas med jämna mellanrum. I medelhårda bergarter är kronan vanligen förbrukad efter 50-100 m borring.



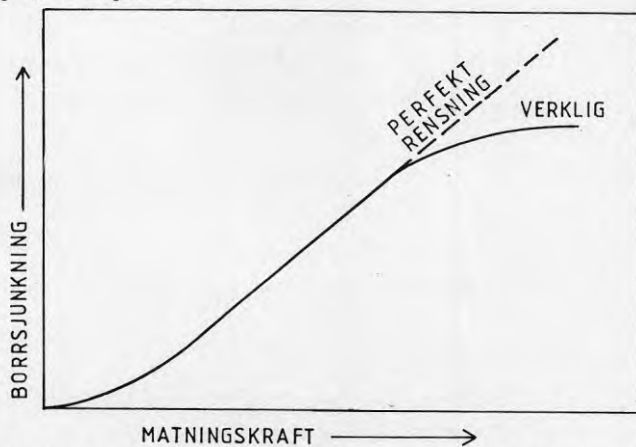
Figur 6.20 Effekten av tandslitage på borrsjunkningen (Edwards 1964).

Man kunde kanske tro att ju hårdare tryck man lägger på borrkronan ju snabbare borrsjunkning skulle man få. Detta är sant, men bara upp till en viss gräns. Förhållandet borrsjunkning/matningstryck framgår av figur 6.21, som också visar jettingeffektens betydelse för borrsjunkningen.



Figur 6.21 Förhållandet mellan borrsjunkning och matningskraft vid olika jetstrålehastigheter (Eckel/Rowley 1957).

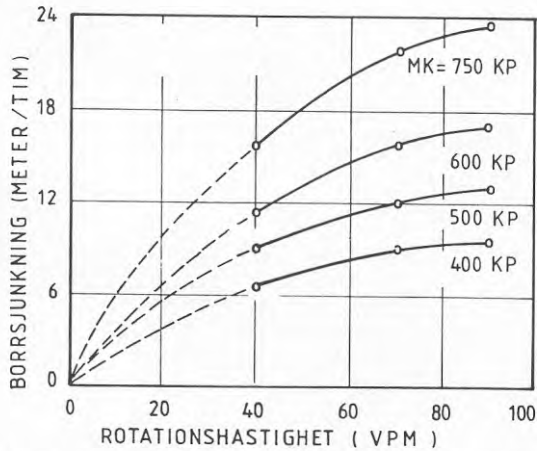
Att borrsjunkning successivt minskar vid ökad matning beror av att rensningseffekten i borrhålsbotten är begränsad. För att erhålla bästa möjliga effekt av insatt energi måste nämligen allt det kax som bryts loss spolas bort omgående. Förhållandet åskådliggörs i figur 6.22.



Figur 6.22 Sjunkhastighetens förhållande till matningskraft som funktion av rensning (Moore 1968).

Perfekt rensning kan i praktiken aldrig erhållas. Den verkliga rensningen blir därför en funktion av matningskraft och jetstråle-hastighet.

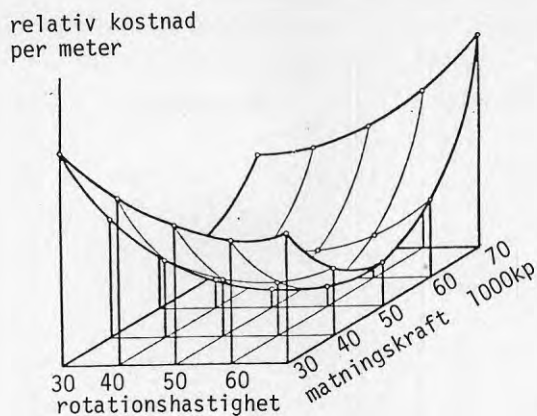
Det råder också ett klart samband mellan borrsjunkningshastig-heten och rotationshastigheten (antal varv per minut). Ju större belastning borrkronan utsätts för, desto större effekt har rota-tionshastigheten på borrsjunkningen. Förhållandet framgår av figur 6.23.



Figur 6.23 Sambandet mellan borrsjunkning och rotationshastighet vid olika matningskraft (MK) (Moore 1960).

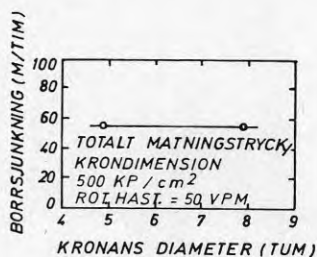
Men även här finns gränser uppåt. Delvis invecklar tidigare omnämnd rensningseffekt, men främst beror det av att tänderna på rullarna inte hinner tränga optimalt ned i formationen vid för höga rota-tionshastigheter. Borrörens rotation överförs ju proportionellt till rullarna.

De olika parametrarnas inverkan på borrsjunkningen är inte enbart en borrarsteknisk fråga utan i hög grad också en ekono-misk. Detta kan illustreras i ett tredimensionellt diagram, figur 6.24, där rotationsparametern sammanvägts med borrartrycks-parametern. Som framgår erhålls den största borrsjunkningen och därmed lägsta relativa kostnad vid 50 varv per minut och 5000 kg totaltryck på kronan i just detta exempel.



Figur 6.24 Optimering av matningskraft och rotationshastighet för bästa borrsjunkningen och därmed lägsta borrhingskostnad (Young 1969).

För att erhålla samma borrsjunkning vid exempelvis 8" borrhning som vid 5" behövs endast att trycket på borrkronan ändras så att det per ytenhet räknat är samma vid båda dimensionerna, vilket visas i figur 6.25. Det skall noteras att övriga parametrar som kan påverka borrsjunkningen hålls konstanta i exemplet.



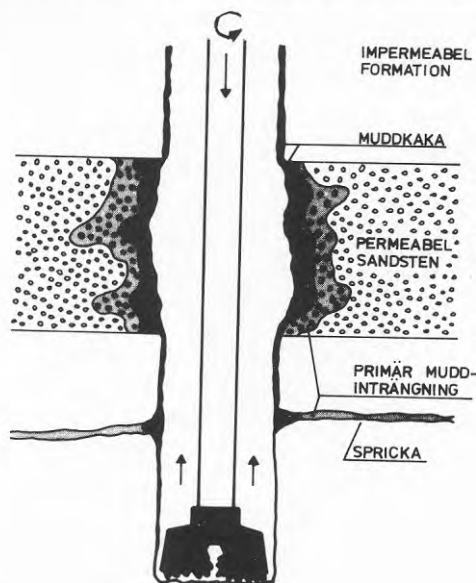
Figur 6.25 Lika borrsjunkning vid samma specifika matningstryck (Campbell/Lehr 1974).

Borrsjunkning sett ur registreringsynpunkt behandlas i avsnitt 6.4.

Som tidigare nämnts användes för det mesta någon form av vätska för att transportera upp borrkaxet från hålet. Vätskan har emel-

lertid fler funktioner. Bl a underlättar den sönderdelningen så tillvida att det vertikala formationstrycket direkt under borrkronan minskar till följd av den hydrauliska tryckpåkänningen. Vidare fås en kylning och i viss mån smörjning av borrkrona, borrhör och pump. Viktigare är kanske att det hydrauliska övertryck som skapas i hålet medför att borrhålsväggen hålls uppe och att borrning därför kan ske utan drivning av foderrör, även i helt okonsoliderade formationer.

En förstärkt borrhålsstabilisering fås genom att tillsätta olika ämnen. Spolvätskan kallas då mudd. Allra vanligast är att använda ett naturligt lermineral, bentonit, som blandas i spolvattnet så att en mer eller mindre tjockflytande blandning erhålles. Under borrningen tränger bentonitmudden ut i formationens porer och sprickor. När rörelsen upphör, gelar bentoniten och en muddkaka byggs upp runt och i borrhålsväggen, se figur 6.26. Härmed förhindras bl a att det sker storskaliga utträngningar av spolvätska i porösa eller sprickiga lager, s k spolförluster. I värsta fall kan nämligen spolförluster orsaka att det hydrostatiska trycket i borrhålet sänks till sådan grad att hålet kollapsar.



Figur 6.26 Muddkakebildning (O. Andersson 1981).

I ett sådant läge har borrararen oftast förlorat inte bara hålet utan också dyrbar utrustning.

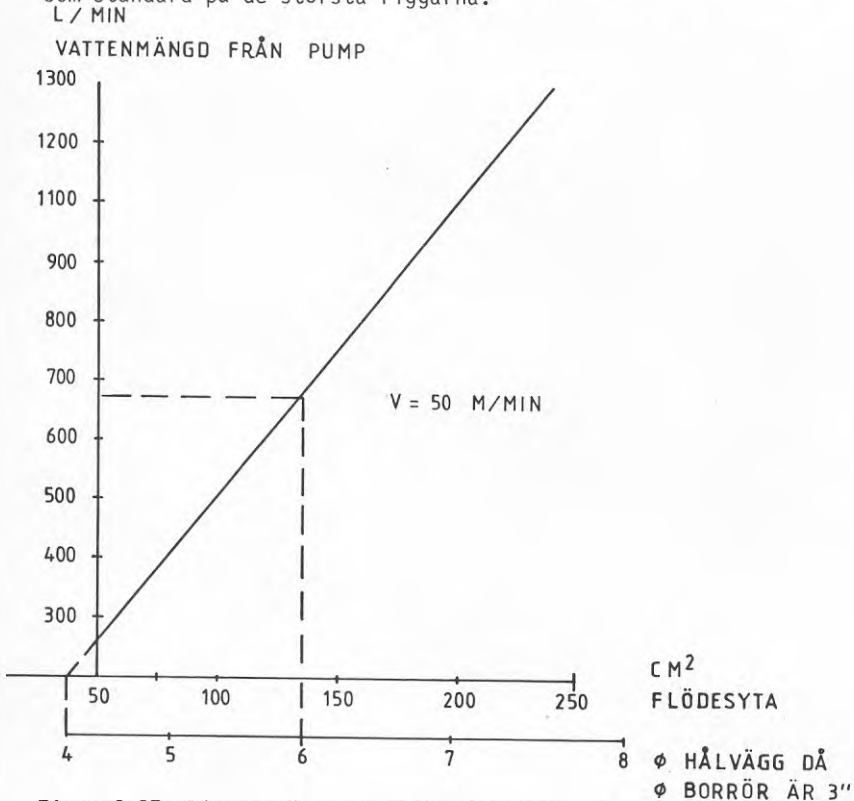
Ett annat fall då risk för hålkollaps föreligger är vid rörpåskärvning. Eftersom spolpumpen då måste stängas av sjunker trycket i borrhålet. Helst bär man upprätthålla ett övertryck motsvarande ca 5 m vattenpelare för att undvika ras. I de lägen man borrar sig ned i en formation med artesiskt grundvatten är faran som störst. Man märker det nämligen inte under själva borrhningen. När sådant inträffar bör annan bormetod övervägas för den fortsatta borrhningen.

Det finns inom oljeborrhningen en hel vetenskap om mudd och muddblandningar. Då man borrar mycket djupa hål är det bl a väsentligt att kunna styra bormuddens densitet, viskositet, bärförmåga, pH-värde etc. Därför finns det på marknaden tusentals olika komponenter att välja på för att få rätt muddsammansättning vid rätt tillfälle.

Vid grundare borrhningar som brunnsborrning normalt är, behöver muddkompositionen inte vara lika sofistikerad, men den skall för den skulle inte förbises. Det är t ex inte lämpligt att använda bentonit för stabilisering och förhöjd viskositet. Orsaken är att bentoniten efter utträngning och gelning i formationen är svår att få bort. På bekostnad av snabb och problemfri borrhning kan resultatet därför bli en dålig brunn eftersom kvarvarande bentonit hämmar tillströmningen till brunnen, jämför med figur 6.26. Detta har under senare år uppmärksammats inom brunnsborrningsbranschen och idag finns flera olika alternativ till bentonit. Det är preparat som är baserade på cellulosa eller stärkelse. Efter borrhningens genomförande bryts dessa gelande substanser ned av sig själva eller genom tillsättning av enzymer.

För att spolvätskan skall kunna lyfta och hålla borrhkaxet i suspension under vägen upp till markytan, där kaxet sedan separeras, fordras att vätskan rör sig med viss hastighet i utrymmet mellan borrhålsvägg och borrhör. Den hastighet som kan rekommenderas

deras ligger mellan 40 och 60 m per minut. Lägre hastighet gör att borrhaxet kan bli kvar i hålet med risk för spolförluster och hålkollaps. Högre hastighet medför ökad erosion och ökat slitage av bl a borrhör och munstycken. Beroende på ytan mellan borrhör och borrhållsvägg måste hastigheten regleras med den spolmängd som via pumpen förs ned i hålet. Figur 6.27 visar mängdens beroende av ytan då hastigheten är 50 m per minut. Exempelvis bör man pumpa med en vattenmängd motsvarande 600-700 minutliter vid 6" borrhörning då 3" borrhör används. Figuren visar också direktspolningens begränsning mot större borrhördimensioner. Vid borrhörning över 8" fordras en betydande pumpkapacitet som bara förekommer som standard på de största riggarna.



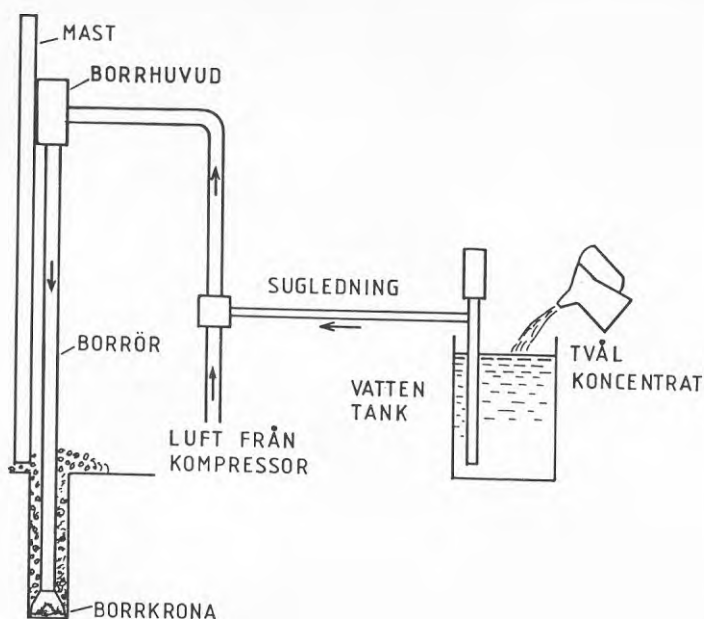
Figur 6.27 Diagram över förhållandet flödesyta mellan borrhör och hålvägg samt erforderlig vattenmängd för att hastigheten skall bli 50 m/min (O. Andersson 1981).

Rotationsborrning med direktspolning kan - även om det är ovanligt i Sverige - genomföras med luft eller skum som alternativ till vatten eller mudd. Utrustningen som användes är i stort sett samma som vid direktspolning. Istället för pump användes en kompressor. Många rotationsborrtrusningar är försedda med både pump och kompressor, så att valfrihet föreligger.

Att använda luft innebär i princip en minskning av trycket i borrhålet. Detta ger som positiv effekt en förhöjd borrsjunkning jämfört med muddspolning. Vidare fås inga spolförluster samtidigt som man inte heller har utgifter för muddkomponenter.

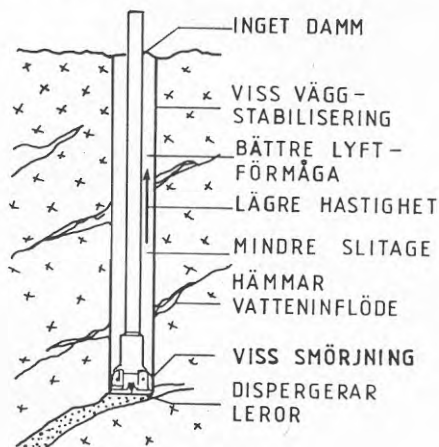
Priset man får betala är dock sämre möjlighet att kontrollera hålets stabilitet. För att kunna få upp kaxet måste också en avsevärd lufthastighet till (en minsta hastighet runt 1000 m per minut erfordras), vilket innebär relativt sett stort slitage av bl a borrhör. Muddens smörjande effekt går också förlorad.

För att i någon mån motverka de negativa effekterna används skum. Normalt rör det sig om tvålmedelskoncentrat som, blandat med vatten, injiceras och piskas till skum genom den turbulenta luftströmmens inverkan. Figur 6.28 visar ett exempel på arrangemang för skumtillsättning.



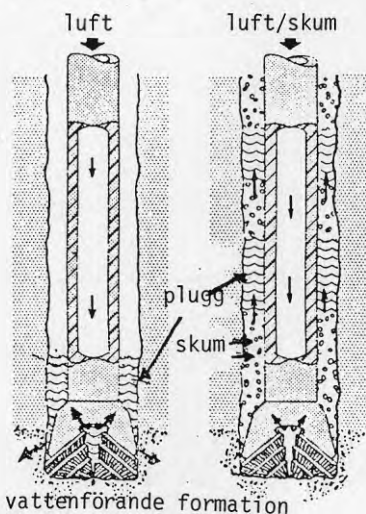
Figur 6.28 Anordning för skumvätskeinblandning vid luftborrning (Atlas Copco 1975).

Några av de fördelar som rent borrningstekniskt kan vinnas genom skumtillsättning summeras i figur 6.29.



Figur 6.29 Några fördelar vid borrning med skum som spolmedel istället för luft (Tröften 1973).

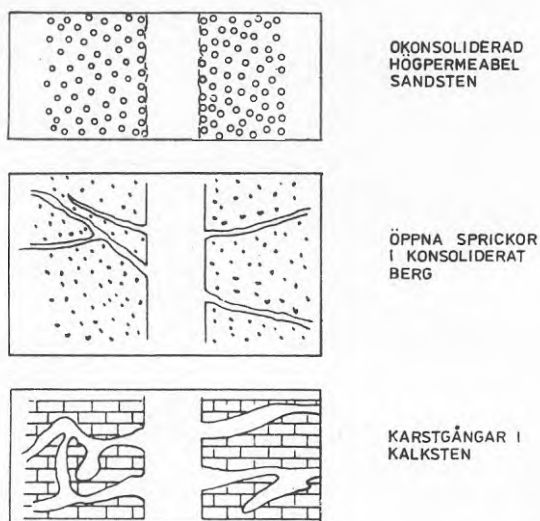
Då endast luft användes uppstår ofta problem då vattenhållande jordlagerformationer påträffas. Särskilt besvärliga är vissa finkorniga jordarter som lera, silt och finsand vilka gärna flyter ut och pluggar hålet. Luften pressas då ut i formationen istället för att strömma upp i utrymmet mellan vägg och borrhör, vilket kan leda till hålkollaps. I bergformationer kan liknande problem uppstå om bergarten är dåligt konsoliderad. Tillsatsen av skum gör, se figur 6.30 att "pluggarna" lyfts och transporteras upp ur borrhålet, främst beroende på att skumblandningen har högre viskositet och densitet.



Figur 6.30 Skummets inverkan på lyftförmågan (Murray/Eckel 1961).

Luft/skumborring har sin största betydelse för borring i konsoliderade sedimentära bergarter och då sådana som är genomsatta av stora öppna sprickor såsom kalkstenar med karstbildning.

Över huvud taget är luft/skumborring lämpligt då svårbemästrade spolförlustproblem kan förväntas uppstå, se figur 6.31.



Figur 6.31 Några exempel på geologiska förhållanden då borrning med luft/skum är lämpligt (Howard/Scott 1951).

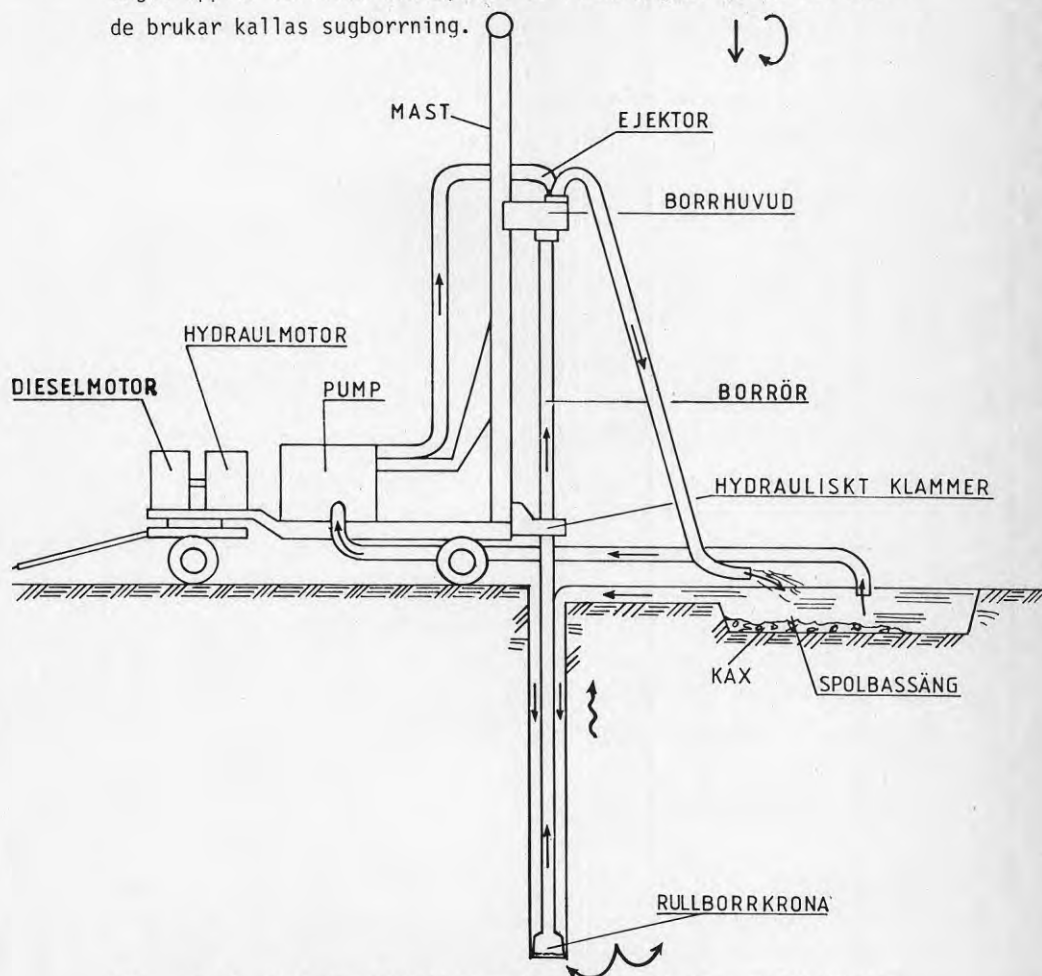
Rotationsborrning med direktspolning har främst utvecklats för borrning i sedimentära bergarter och metoden är optimal i de flesta typer av sand-, kalk- och skifferbergarter. Metoden har visat sig gångbar även i lösa jordlager. Dock medför borrning i block- och stenrika jordlager vissa svårigheter. Löst lagrat och stenbemat grovkornigt åsmaterial är direkt olämpligt.

6.3.3 Rotationsborrning med omvänd spolning

Direktspolningens begränsning till borrning i relativt små dimensioner är huvudanledning till utveckling av den omvända spolningstekniken. Skillnaden gentemot direktspolning består främst i att flödespilarna är omvända, se figur 6.32 och jämför med figur 6.16 (direktspolning). Vid omvänd spolning leds således vattnet eller mudden ner i hålet på borrörens utsida och lyfts upp genom borrörens för att därifrån via borrhuvud och vattenleka föras ut i sedimentationsbassängen.

Då metoden utvecklades användes i princip samma utrustning som den för direktspolning. Man bytte helt enkelt ut borrörens till

en något större dimension och så sattes slangen för kolvpumpens sug sida till trycksidan och vice versa så att spolningen kunde sugas upp ur borrhöret och spolas ut i bassängen. Detta förfarande brukar kallas sugborrning.



Figur 6.32 Rotationsborrning med omvänd spolning. Utrustningen är ofta monterad på lastbil (Malmergs I Yngsjö AB u.å.).

Begränsningen med detta sätt att få upp spolningen är sughöjden. Borrörens längd bör inte vara mer än 3 m, vilket innebär ca 4 m sughöjd vid varje rörs början, för att metoden skall fungera. För att komma från detta problem används numera injektorpumpning

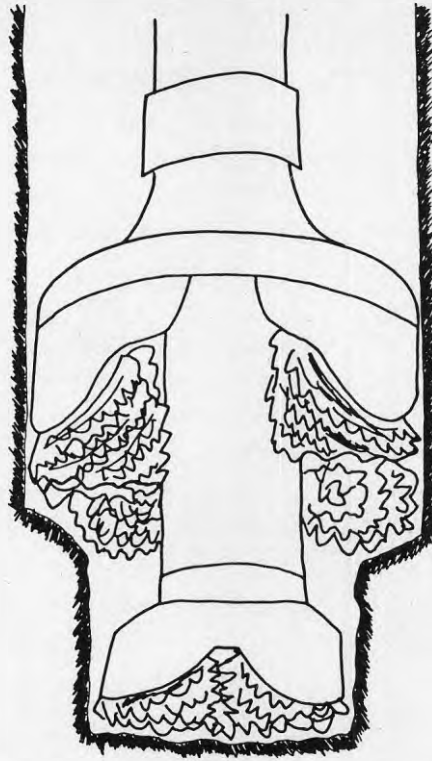
i allt större omfattning. Genom att i borrhören injektera tryckluft eller en riktad vätskestråle med jämna mellanrum, lyfts alternativt trycks, spolningen upp genom rören. Ett mindre försörjningsrör sitter då fast på själva borrhörets yttersida och från detta leder munstycken in i borrhöret vanligen med 25-50 m mellanrum. Borrhören är oftast 5-6" i diameter och skarvas med flänsar.

I övrigt föreligger samma behov av hålväggsstabilisering som vid direktspolning. Användande av mudd som spolvätska är därför lika viktigt och fyller samma funktioner som tidigare beskrivits. Också samma risker för hålkollaps finns då t ex en formation med stort hydrauliskt tryck påträffas under borrhning.

Det omvända spolningsförfarandet tillgrips vanligen då brunnar i stora dimensioner skall anläggas. Borrhning i dimensionen 50-60" är inte ovanligt, normalt rör det sig dock om borrhning i 15-30"-klassen.

I de mindre dimensionerna används samma typ av rullkrona som vid direktspolningen. Munstyckena har dock ersatts av ett öppet hål så stort att de största kaxbitarna som fås vid nedmalningen kan passera. Vid borrhning i jordlager används fingerkrona, se figur 6.17. Hålet till borrhöret är då ofta så stort att även mindre stenar kan sugas upp.

Vid borrhning över ca 20" användes s k rymmarkronor, se figur 6.33, där den konventionella trerullskronan fungerar som pilotkrona. Sidorullarna rymmer sedan hålet successivt till den slutliga dimensionen.



Figur 6.33 Rymmarkrona för borrning i stor dimension (O. Andersson 1981).

Löst lagrade, sten- och blockförande jordlagerformationer ger de största borrningstekniska problemen. Borrmetoden användes sällan för undersökningsbörning.

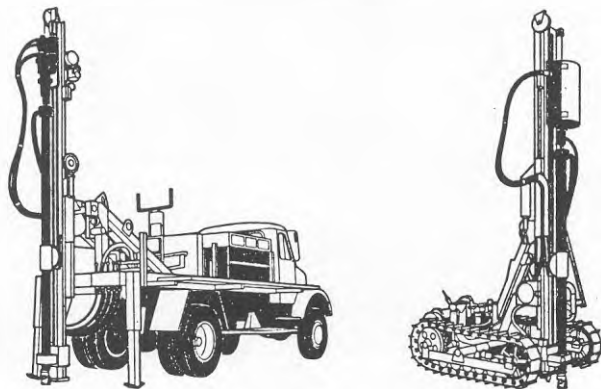
6.3.4 Hammarbörning

Metoden att med kombination av slag och rotation borra sig ned genom ett hårt berg har växt fram vid sidan om sten- och gruvindustrin och då främst för att göra spränghål. Krut började användas vid bergssprängning någon gång under 1500-talet. Till en början användes enkla redskap för håltagningen. Idag är spränghålsbörning dominerande inom den tunga börningen och de utrustningar som används kännetecknas av en långtgående specialisering och effektivitet. I Sverige har den slående roterande borrmetoden

fått benämningen "hammarborrning". Ibland används termen "tryck-luftsborrning".

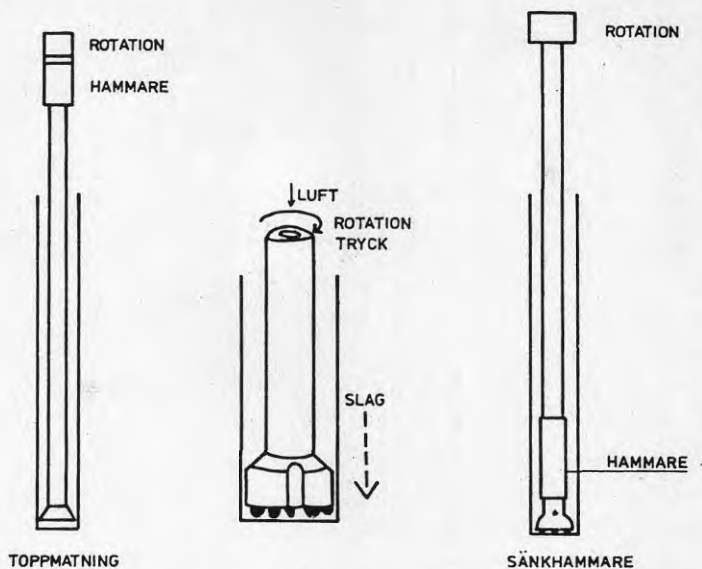
Eftersom metoden har bäst verkningsgrad i hårda bergarter, exempelvis granit och gnejs, har den under senare år gjort stora framsteg inom brunnborrningen. Sveriges berggrund består ju till 95% av hårt urberg.

Maskiner som är gjorda för eller kan användas till hammarborrning är klart dominerande inom brunnborrningsbranschen. Inte mindre än 85-90% av de ca 180 rotationsborrmaskinerna är av sådan typ. Häri ingår ca 15-20 utrustningar som också användes för rotationsborrning med direktspolning. Figur 6.34 visar det principiella utseendet på ett par utrustningar som används för hammarborrning.



Figur 6.34 Några utrustningar för hammarborrning (Sandvik Coromant/Atlas Copco 1977)

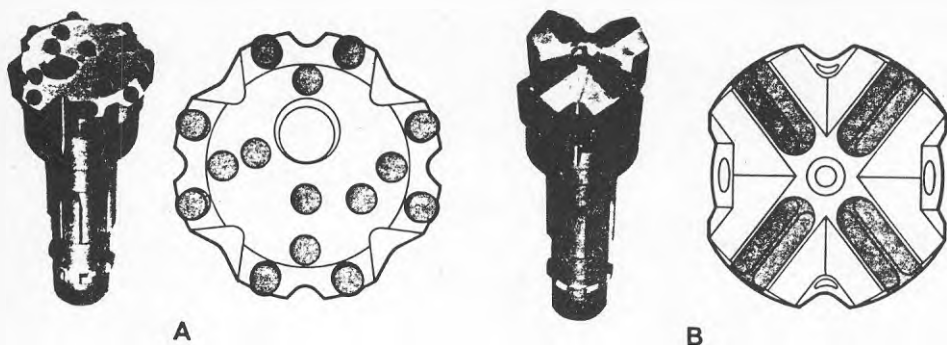
Hammarborrning sker enligt två principer. Den äldsta av dessa är när det slående momentet finns inbyggt i borrhuvudet, topphammare. Alternativet är en nere-i-hålet-motor, sänkhammare, som alstrar slagrörelsen, se figur 6.35.



Figur 6.35 Principen för topp- och sänkhammarborrning (O. Andersson 1981).

Utvecklingen av sänkhammaren har gjort att många konventionella rotationsriggar kan användas för hammarborrning. Det är annars det slående momentet som utgör den största skillnaden gentemot rotationsborrning med direktspolning. Upptemperaturen av kax sker visserligen medelst direktspolning, dvs via borrhörens på nervägen och utrymmet mellan borrhör och borrhålsvägg på uppvägen, men som spolmedel användes nästa alltid luft, ibland med skumtillsats.

Hammarborrkronorna är av två typer. Antingen är de utformade med skärande egg, skärkrona, eller också med stiftkrona, se figur 6.36. Både skär och stift består av hårdmetall i olika kvalitet, ju hårdare bergart som skall borraras desto slitstarkare legering väljes. Verkningsgraden för de båda kronotyperna är tämligen lika. Däremot anses stiftkronan ha en något större livslängd, bl a beroende på att fastsättningen av stift medger användande av slitstarkare hårdmetall än vad fallet är för skärkronan. Skärkronan löds fast medan stiften pressas in i kronhuvudet. Dessutom behöver en stiftkrona inte slipas om lika ofta som en skärkrona.



Figur 6.36 Hammarborrkronor. A Stiftkrona. B Skärkrona. (Atlas Copco 1976).

Kronor finns tillgängliga för borrhning från ca 2". Vid borrhning med topphammare är det normalt att inte överskrida 5". Sänkhammarborrning däremot är, avhängigt fabrikat, begränsad till 3 5/8" eller 4 1/2" nedåt i dimension. För närvarande finns hammare (nere-i-hålet-motorer) som tillåter borrhning upp till 17". Skrymmarkrona är ett alternativ vid borrhning i stor dimension.

Vid borrhningen alstras stötvågor från topp- eller sänkhammaren med viss frekvens. Hammaren drivs av tryckluft. Vid topphammarborrning fortplantas stötvågen längs borrhörens ned till kronan. Borrhörens roterar en viss vinkel mellan varje stötvåg. Vid sänkhammarborrning alstras stötvågen i nästan omedelbar anslutning till borrhkronan. Kontakt mellan borrhålsbotten och borrhkrona upprätthålls hela tiden genom att ett visst matningstryck läggs på kronan. På flera utrustningstyper är både matarmotor och rotationsmotor tryckluftdrivna, men vanligen drivs dessa funktioner av hydrauliska system.

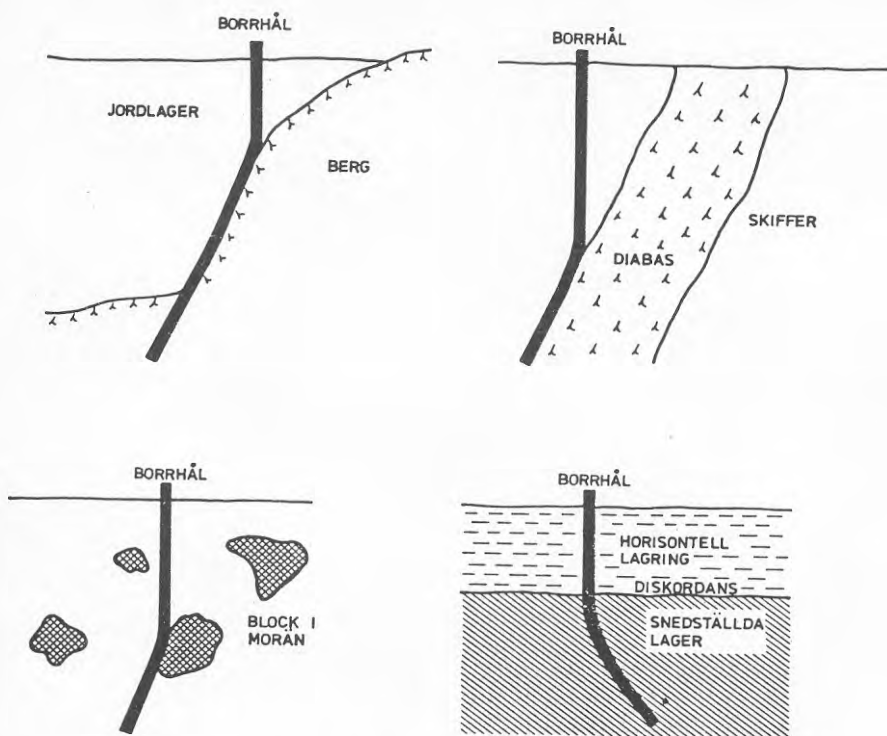
Borrhkronan påverkar borrhålsbotten på ett komplext sätt. Förenklat beskrivet fås en primär spräckning via stötvågen av det slående momentet samt en sekundär riktad flisning av det roterande tryckande momentet i kombination med slaget. De matematiska härledningarna som gjorts av processen visar att slagenergin är den klart dominerande komponenten vid destruktionen. Detta inne-

bär i praktiken att metoden har störst verkningsgrad vid borrhning i hårda och spröda bergarter.

Betraktar man energiåtgången i förhållande till avverkningshastigheten finner man att sänksammarborrning har en större verkningsgrad än topphammarborrning. Detta beror på att en viss mängd stötvågsenergi reflekteras och går förlorad vid varje rörskarv på vägen ned till borrhkronan. Eftersom sänksammararen sitter i direkt anslutning till kronan uppträder inte detta vid sänksammarborrning.

Genom att sänksammararen har högre verkningsgrad fordrar den också mindre mängd luft dvs jämförelsevis mindre kompressor.

En annan fördel med sänksammarborrning är att de borrhör som används inte behöver vara av samma höga kvalitet och godstjocklek som erfordras vid topphammarmatning. Borrningstekniskt är styrningen av borrhålet med sänksammarare främst beroende på att tyngdpunkten ligger nära hålbotten. Topphammarmatning kan lättare ge upphov till snedborrning, s k deviation. Figur 6.37 visar ett par fall då okontrollerad deviation kan uppträda på grund av geologiska förhållanden.

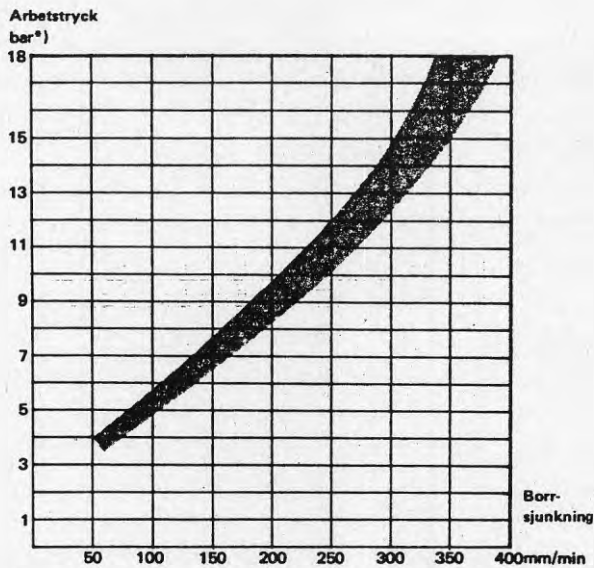


Figur 6.37 Exempel på snedborrning till följd av geologiska strukturer (O. Andersson 1981)

Trots sänkhammarens till synes många fördelar finns det flera sammanhang där topphammaren passar lika bra eller bättre, bl a vid rutinartad skotthåls- och injekteringshålsborrning. Inom brunnsborrningen och den bergstekniska sidan spelar hammarborrning med topphammare sin största roll som undersökningsmetod. Till metodens fördelar kan bl a räknas att borrning är möjlig i liten dimension (från ca 2") och är därmed mer ekonomisk. Dessutom blir ofta proverna av bättre kvalitet än då sänkhammare användes.

För att transportera borrhaxet upp ur hålet med luft fordras en viss spolhastighet. Hastigheten går emellertid inte att styra utan att samtidigt inverka på arbetstryck på hammare samt luftförbrukning till matningsmotor etc. Val av luftmängd och arbets-

tryck är därför något som styrs av flera faktorer. Borrsjunkningen vid sänkhammarbörning är direkt proportionell mot arbetstrycket, se figur 6.38. Det är alltså fördelaktigt att ligga med ett högt arbetstryck. Detta medför även ett högt spolutflöde, vilket dock är arealberoende. En minsta spollufthastighet av ca 15-20 m/s rekommenderas.



Figur 6.38 Nettoborrsjunkning vid olika arbetstryck (Atlas Copco 1976)

Trots tillräcklig hastighet kan kax ansamlas vid passager där hastigheten minskar, eller när luften går ut i sprickor och porer. Genom att lyfta krona och hammare så att slagverket stoppar rusar all luft genom hammaren vilket ger en väsentlig ökad spolluftsmängd och därmed också en rensblåsningseffekt. I andra fall kan en instabil hålvägg, förekomst av svällande leror, stora öppna sprickor etc försvåra rensningen.

Genom att tillsätta skum såsom beskrivits tidigare (figur 6.28) förbättras chanserna att genomföra borrarbningen. Stabilisering med mudd är endast tillämpligt vid borrarbning med topphammare.

En faktor som starkt inverkar på borrhjunkningen är grundvatten-tillströmningen till borrhålet under borrhningens gång. I princip gäller att ju mer vatten som flödar in i hålet ju större del av arbetstrycket går åt att lyfta vattnet ur hålet. Det blir således mindre och mindre del kvar till själva hammaren.

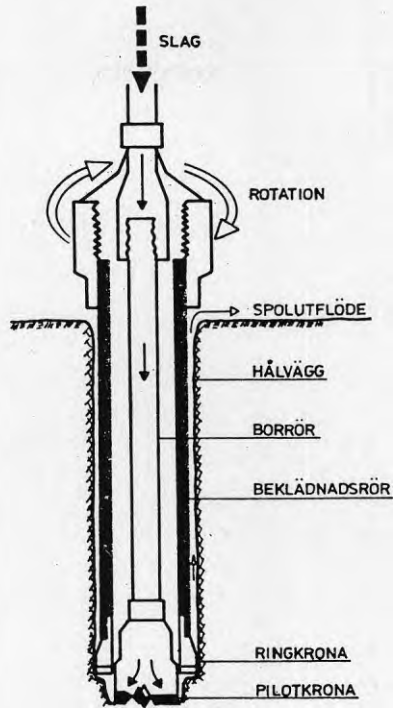
Införandet av hammarborrtekniken har i hög grad förändrat brunnsborrningsmarknaden. Som tidigare nämnts har metoden under sista tioårsperioden successivt ersatt den väl beprövade linstötmetoden. En bergborrning som tog månader att borra med linstöt tar endast ett par dagar med hammarborrning. Det är emellertid inte bara tidsvinsten som ligger bakom metodens snabba expansion på marknaden. I hög grad bidrar också hammarborrnings breda användbarhet, inte bara inom bergborrningen utan också framgår av nästkommande avsnitt, inom jordborrningen.

6.3.5 OD- och ODEX-borrning

Det har alltid ansetts lättare att borra ett hål i berg än i jord. Problemet med borrning genom jordlager är många, vilket baserar sig på att jordlagren är löst lagrade samtidigt som kornfördelningen ofta snabbt växlar både i djup och sidled. Förekomst av block, sten samt flytbenägna jordarter gör det inte lättare. För att få ett stående hål krävs att en hålinfodring görs under eller strax efter borrhningen. För bara några tiotal år sedan fanns endast ett sätt att ta sig genom jordlagren, nämligen som rörborrning med linstötutrustning.

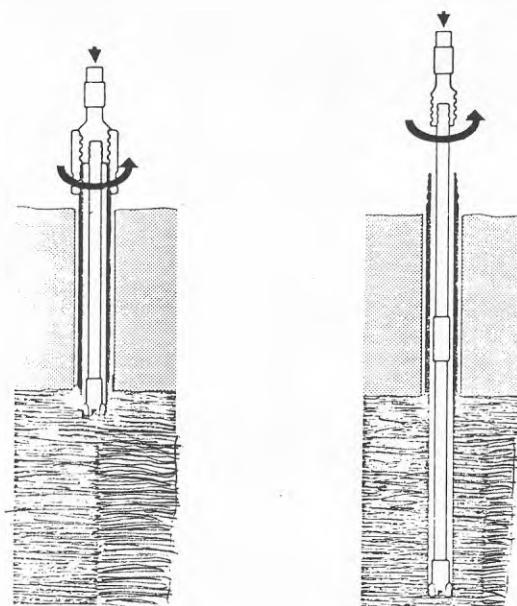
Parallellt med utvecklingen av hammarborrtekniken har två svenska företag i samarbete (Atlas Copco - Sandvik) tagit fram en mer eller mindre revolutionerande metod för rörborrning som klarar i stort sett alla typer av jordlager. Utvecklingen har skett i etapper och inleddes med en metod som fick benämningen OD-borrning (från engelskans "Overburden Drilling", vilket betyder jordborrning).

OD-utrustningens komponenter framgår av figur 6.39.



Figur 6.39 Utrustning för OD-borring (O. Andersson 1981).

Metoden innebär en samtidig nedborring av dels borrhuvud med skärkrona och dels ett ytterrör med ringkrona. Borringen utförs med utrustning för topphammarborring. Genom att ytterröret kopplas till borrhuvudets roterande moment fås det att rotera under neddrivningen. Slagfunktionen överförs via borrhuvudet till skärkronan som ligger något djupare än ringkronan och således fungerar som pilotkrona. När berget nås kan ytterröret kopplas från borrhuvudet och borringen fortsätta utan ytterrör som figur 6.40 visar.

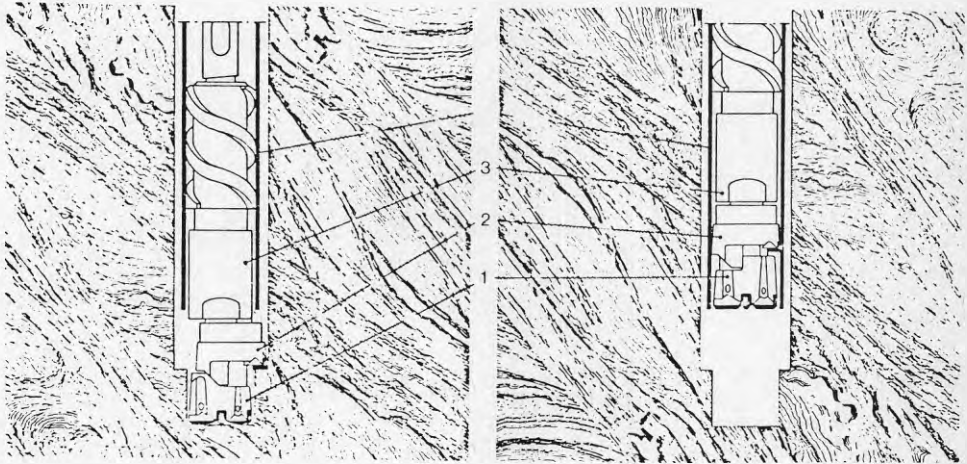


Figur 6.40 OD-borrning genom jordlager med fortsatt borrning i berg.

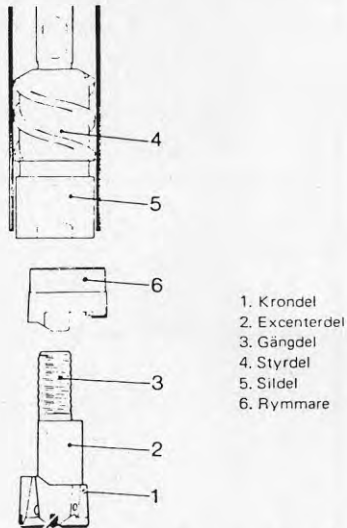
Som spolmedel kan både luft, skum, vatten eller mudd användas. Slagfrekvens, rotationshastighet och matning är liksom vid annan hammarbörning kontrollerbart. Det stora problemet med metoden är det roterande ytterröret. Slagen orsakar en viss packning runt hålet vilket successivt ökar friktionen mot ytterröret. Allt större vridkraft erfordras och till slut är fortsatt borrning omöjlig. Under gynnsamma förhållanden kan dock rörbörning ske till flera tiotal meter. Utrustning finns för rörbörning mellan 2 3/4" och 5".

Som en vidareutveckling av OD-metoden lanserades en bit in på 1970-talet ODEX-metoden. EX innebär att jordbörning sker med excenterborrkrona. Denna består av en pilotkrona (vanligen skärkrona) som avverkar pilothålet och en rymmaren som utvidgar hålet samt en styrardel, se figur 6.41. Jämfört med OD-metoden ersätter rymmaren ringkronan. Foderröret behöver därför inte roteras ned. I stället får de antingen följa med ned av egen tyngd eller när friktionen blir för stor drivs de ned med maskinens slagfunktion.

Till ODEX-kronans pilotdel hör en excentrisk förskjuten lagerdiameter omkring vilken rymmaren kan vridas, se figur 6.42.



Figur 6.41 ODEX-metoden i princip (Atlas Copco 1975).
1. Pilotkrona 2. Rymmare 3. Styrdel



Figur 6.42 ODEX-utrustningens komponenter i detalj (Atlas Copco 1975).

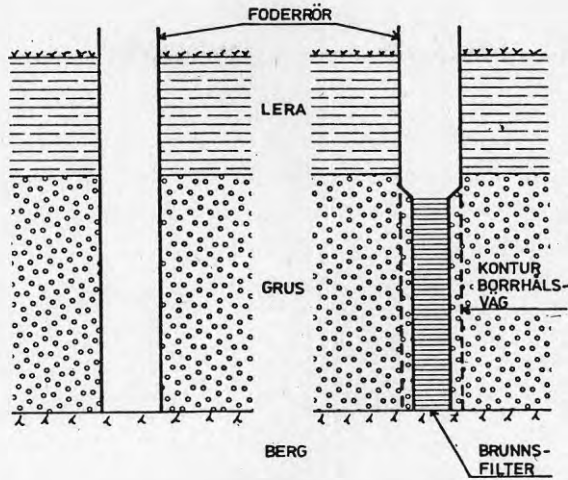
Spiralbommarna sluter tätt mot foderrörets innervägg. Under den spiralförsedda styrningen sitter en sildel. Denna har en avpassad diameter så att utrymmet till beklädnadsröret inte skall tillåta annat än små kaxfragment att passera. Härvid underlättas kaxtransporten samtidigt som risken för fastkilning vid upptagning minskar.

Rymmaren fälls ut i och tas ur borrläge genom vridning. Under borringen spolaskas med luft eller skum. Utloppskanaler för spolning finns i såväl pilotkrona som rymmaren och sildel. Kaxet samlas i spalten mellan sildel och styrning varifrån det transporteras genom spiralbommarna och vidare upp ur borrhålet.

Efter det att jordlagren genomborrats kan ODEX-kronan tas upp och bytas till en bergborrkrona för fortsatt borring, i princip enligt tidigare figur 6.40.

ODEX-kronor finns för närvarande i fyra dimensioner, nämligen 76, 115, 127 och 165 mm. Måtten anger dimensionen för fortsatt borring då foderrören satts.

Inom brunnsborring används ODEX-metoden främst för inklädning av jordlager innan fortsatt borring i berg. Syftet är då att färdigställa en bergborrad brunn. Inte fullt så vanligt är att borra med foderrör även i berg. I vissa delar av landet förekommer dock grundvattenförande sedimentära bergarter som fordrar inklädning, exempelvis lösa sandstenar. I sådana fall finns möjligheten att ODEX-borra genom den vattenförande formationen för att sedan sätta ett brunnsfilter och slutligen dra upp rören till lämplig nivå. Alternativt kan redan slitsade foderrör användas, se figur 6.43.



Figur 6.43 Sättning av förlorat filter efter ODEX-borrning (O. Andersson 1981).

6.3.6 Enkel rördrivning

Ett gammalt och beprövat sätt att göra hål i marken är att slå eller stöta ned något form av långsmalt och spetsigt don. Vi känner alla till hur man t ex för hand kan spetta ett hål eller slå ned en påle i marken med slägga. För att denna håltagningsmetod skall fungera krävs att jordlagren är löst lagrade och således kan trängas åt sidan och lämna utrymme för hålet.

I modifierad form har den undanträngande bormetoden fått betydelse inom brunnstekniken, inte särskilt mycket som brunnsborrningsmetod utan mer vid rekognoserings- och undersökningsborrning. Det är därför inte oväntat att de flesta borrustrustningar, som används speciellt för rördrivning, finns hos konsultfirmor och liknande som arbetar med grundvattenundersökningar.

Två typer av speciella utrustningar förekommer. Den enklaste och vanligaste består av en fristående s k hejarbock, ursprungligen en geoteknisk utrustning som används vid hejarsondering. En tyngd eller hejare, som lyfts och sedan fritt får falla ned på

rörändan står för den slagenergi som behövs för att driva ner röret. Hejaren drivs numera normalt med motor.

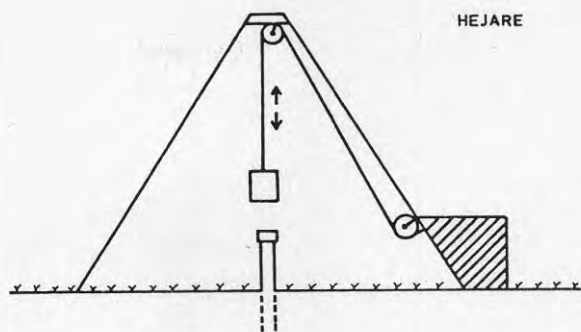
Under de senaste 20 åren har det blivit allt vanligare att övergå från hejare till tryckluftshammare. I samband härmed har hela utrustningen eller delar av den monterats på terränggående fordon. Eftersom alla sådana utrustningsenheter är mer eller mindre hemmabygga är de också av skiftande utformning.

Vid sidan av de speciella rördrivningsutrustningarna används ibland linstötmaskiner. Det gäller då vanligen drivning av spetsbrunn, jfr kap 3, figur 3.5, i relativt grov dimension. Figur 6.44 visar några olika utrustningar för rördrivning.

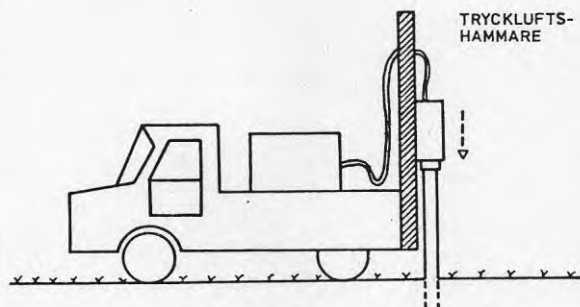
Rördrivning med hejare eller tryckluftshammare är normalt begränsat till 3" uppåt och 1 1/2" nedåt i dimension.

Beroende på främst ändamålet med rördrivning men också geologiska förhållanden samt olika erfarenheter har spetsen och nedre delen av röret olika utformning. Den varierar från helt sluten och spetsformad rörbotten med perforerad nedre rörvägg till helt öppen rörbotten med eller utan perforering, se figur 6.45.

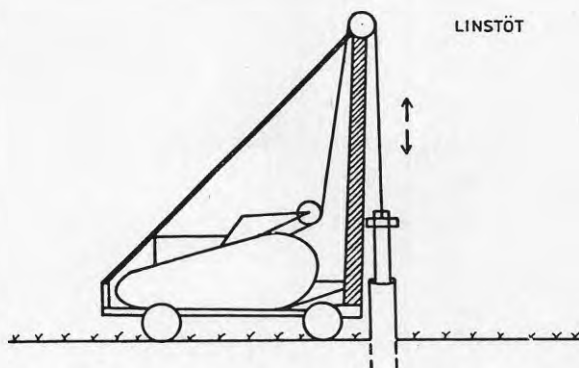
Det vanligaste vid rekognoseringsborrning är att driva rör med sluten spets och perforering. Detta förfaringssätt innebär att jordmaterialet först trängs åt sidan av spetsen och sedan tillåts att tränga in genom hålen i rörväggen. Materialen kan sedan hämtas upp med skruv, skopa eller också spolats upp. Det vanligaste är att spola upp materialet med tryckluft, figur 6.46. Även vatten kan användas för att spola upp materialet vilket ibland kanske är mindre praktiskt med tanke på att både tillgång till pump och vatten då erfordras.



HEJARE

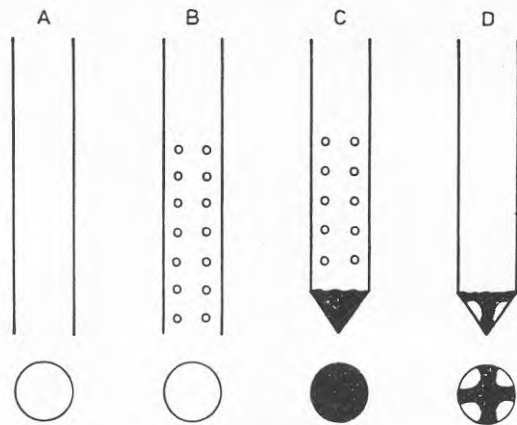


TRYCKLUFTS-
HAMMARE

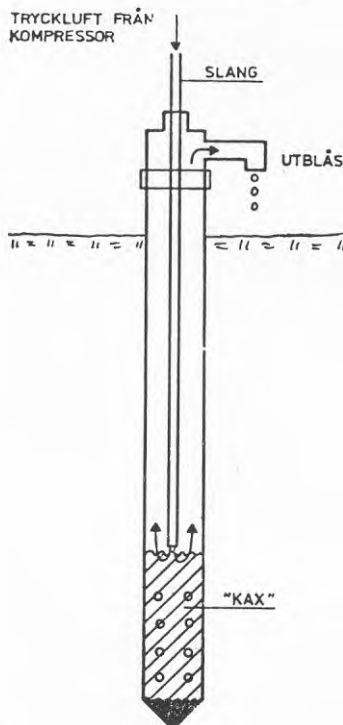


LINSTÖT

Figur 6.44 Några vanliga typer av rördrivningsutrustningar (O. Andersson).



Figur 6.45 Några olika utformningar av rörets nedre del. (A) Öppet rör. (B) Öppet rör med perforerad nederände. (C) Sluten spets med perforerad nederände. (D) Hålförsedd spets, s k krysspets (O. Andersson 1981).



Figur 6.46 Rörrensning med tryckluft (O. Andersson 1981).

Rördrivningsmetoden användes huvudsakligen vid rekognoserings- och provtagningsborrning samt vid drivning av observationsrör (mätrör). Metoden är begränsad till jordlager med ringa block- och stenhalt. Bäst fungerar den i isälvsavlagringar (åsar, deltan etc). Vissa problem kan uppträda vid borrning i styva sedimentära leror. Borrningsdjup runt 50 m är under gynnsamma jordlagerförhållanden fullt möjligt.

4.6 Provtagning och annan registrering vid undersökningsborrning

6.4.1 Bakgrund

En undersökningsborrning går främst ut på att provta och dokumentera jord- och berglagren. Provernas kvalitet och möjligheterna till annan dokumentation än provtagning varierar dels med borrhettod och dels med den yrkesskicklighet som borrhpersonalen besitter.

Dokumentationen av ett borrhål kan dels ske under borrhningens gång genom provtagning, registrering av borrsjunkning, spolförluster (om vatten eller mudd används), förändringar i spolvätskans färg och sammansättning, kontinuerlig kapacitetstest, borrhbeteende och annan protokollföring, och dels efter borrhningens genomförande genom diverse loggningar och tester i hålet. Figur 6.47 ger en sammanställning av de metoder som står till buds.

I det följande skall vi främst uppehålla oss vid den dokumentation som kan göras under själva borrhningen men också något beröra de enklaste loggningsmetoderna.

REGISTRERING

EFTER BORRNING (REB)

PROVGENOMGÅNG (PG)

Textur

Struktur

Mekaniska egenskaper

Kemiska egenskaper

Fysikaliska egenskaper

Hydrauliska egenskaper

Vattenbeskaffenhet

BORRHÅLSLOGGNING (BHL)

Mekaniskt

Kemiskt

Geofysiskt

HYDRAULISKA TEST (HT)

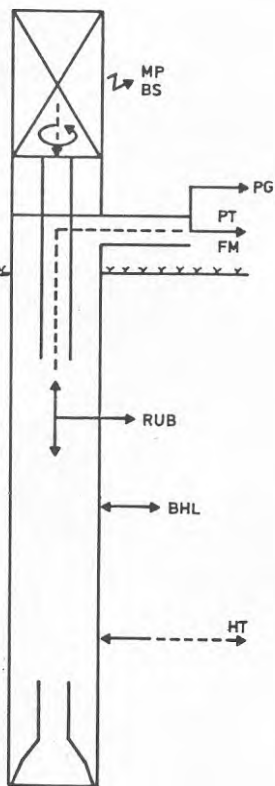
Kapacitetstest

Produktionstest

Provpumpning

Injektionstest

Vattentrycksmätning



REGISTRERING

UNDER BORRNING (RUB)

BORRN. PARAMETRAR (BP)

Borrdjup

Matningskraft

Rotationshastighet

Vridmoment

Spoltryck

Beteende

PROVTAGNING (PT)

Kärnor

Kax

Spolvätska

Vattenprov

FLÖDESMÄTNING (FM)

Spolförlust

Kont. kapacitets-

test

BORRSJUNKNING (BS)

Borrningshastighet

Relativt borrar-

ningsmotstånd

Relativt borrar-

kroneslitage

Figur 6.47 Möjliga dokumenteringar under och efter borrning. Pilarna visar registreringarnas relativa räckvidd ut i formationen (O. Andersson 1981).

6.4.2 Konventionell protokollföring

I stort sett alla brunnsborrhare har genom årens lopp fört någon form av borrhprotokoll och då i huvudsak för eget bruk. Ett antal större borrhningsfirmor har också byggt upp omfattande arkiv. Borrhprotokollen är dock av mycket varierande kvalitet. Ibland är uppgifterna ytterst knapphändiga och utan information om jord- och berglager men andra gånger kan de innehålla fylliga beskrivningar av såväl geologi som provpumpningar och vattenbeskaffenhet.

Från att ha varit en intern angelägenhet har protokollföringen från och med 1976 blivit lagstadgad i "lag om uppgiftsskyldighet vid grundvattenundersökning och brunnsborrning (SFS 1975:424)". I lagtexten sägs bl a att "den som yrkesmässigt utför borrhning.. ..i syfte att undersöka förekomst av grundvatten eller att utvinna sådant är skyldig att till Sveriges Geologiska Undersökning (SGU) skriftligen lämna redogörelse för arbetet och dess resultat".

De borrhningsdata som inkommer till brunnsarkivet vid Sveriges Geologiska Undersökning arkiveras dels som kort och dels i dator.

De uppgifter man inforrdar framgår av protokollexemplet, figur 6.48.

Det centrala arkivet fyller flera viktiga uppgifter. Sett ur brunnsborrharens eller grundvattenundersökarens synpunkt är arkivet en stor tillgång då det gäller att lokalisera brunnar eller brunnsområden men också för att få förhandsuppgifter inför en borrhning. Arkivet är offentligt så var och en kan ta del av innehållet.

Borrfirma

**BRUNNS- och BORR-
PROTOKOLL**

Utskriftsdatum

Borringen utförd, fr o m : t o m

SGU:s anteckningar (Ifylls ej)

Brunnsnummer

Ankomstdatum

Uppgiftskyldighet enligt SFS 1975:424

Exemplar 1 insänds till Sveriges geologiska undersökning, Brunnarkivet, Box 2048, 183 02 TÄBY

Exemplar 2 kan lämnas till uppdragsgivaren

Exemplar 3 behålls av borrfirmen

Borrplattens läge	Fastighetsbeteckning		Ort	
	Församling		Kommun	Län/bokstav
Borrplattens läge på fastigheten				
Ägare/Beställare	Ägare/Beställares namn			Telefon (även riktnr)
	Utdelningsadress (gata, nr, box, fack e d)		Ortsadress (postnr och ortnamn)	
Jordarter/Bergarter m m	Djup under markytan från	till	Jordart/Bergart	Anmärkningar (vattenförekomst, färg, släppor m m)
	-	m		
	-	m		
	-	m		
	-	m		
Tekniskt utförande m m	Schaktning (från - till)	m	diameter	Borrmaskintyp
	-	m	mm	mm
	Borring med rör (från - till)	m	mm	Borrhål fodrat m
	-	m	mm	diameter
Provpumpning	Borring utan rör (från - till)	m	mm	slårör
	-	m	mm	mm
	Totaldjup från markytan	m	mm	plaströr
	-	m	mm	mm
SGU:s anteckningar (Ifylls ej)	Borrhål utgör fördjupning av	grävd brunn	borrad brunn	Vattenanalys
	-			Ja
	-			Nej
	Tätning mellan foderrör och berg har skett med	cementer	extra plaströrsfodring	bifogas
Pumpning	Höjd - om avvägning företagits	Röröverkant	Markyta	möh
	-	m	m	m
	Typ av provpumpning	Blåsning	Flottör-mätning	Pumpning
	-	m	m	m
Övriga anmärkningar	Borrtdjup under markytan	m	Pumptid	Vattenmängd
	-	m	tim	lit/tim
	Vid provpumpningen sänkt vattentytan (räknat från markytan)	m	lit/tim	-
	-	m	lit/tim	-
Underskrift	Stabil grundvattennivå under markytan	Datum vid mätningstillfället	Mätning av grundvattennivån har skett	antal timmar
	-	m	före pumpning	efter pumpning
	Övriga anmärkningar (sprängning, gasförekomst, saltvatten m m)			
Blankettgivare	SGU:s anteckningar (Ifylls ej)	X-koord	Top karta	
	Vattenmängd	Jordart	Y-koord	Ekon karta
	Avsänkning	Bergart	Z-koord	Jordartskarta
	Spec kapacitet		Övr kartor	Berggrundskarta

SGU 34 Koncept 1975-11 10:00 utgåva nr 2004 4 1/148 U F I L L J 311 18 00

Figur 6.48 Exempel på brunnsprotokoll typ SGU (Modig 1878).

6.4.3 Provtagning

Provtagning vid borrhning brukar indelas i ostörd resp störd sådan. Med ostörd provtagning menas att en kärna av jord- eller bergmaterialet stansas ut och hämtas till markytan med någon form av kärnprovtagare. Man får då ett prov från bestämd nivå och med bibehållna strukturer och egenskaper. Inom grundvattenprospekteringen är ostörd provtagning mycket ovanlig, vilket främst beror på att metoden anses kostsam.

Vi måste således i första hand förlita oss på störda prover. Detta innebär att proven som når markytan endast till viss del berättar om hur det ser ut där nere. Egenskaper som lagringsstruktur, packningsgrad (i jord), sprickighet (i berg), homogenitet etc går förlorade. Oftast får man dock en god bild av kornfördelning i jord samt bergartsfördelning i berg.

Provernans kvalitet och representativitet varierar dock avsevärt. Framför allt inverkar borrhmetod och sättet varpå borrhningen och provtagningen genomförs. (O. Andersson 1981).

6.4.3.1 Provtagning vid linstötborrning

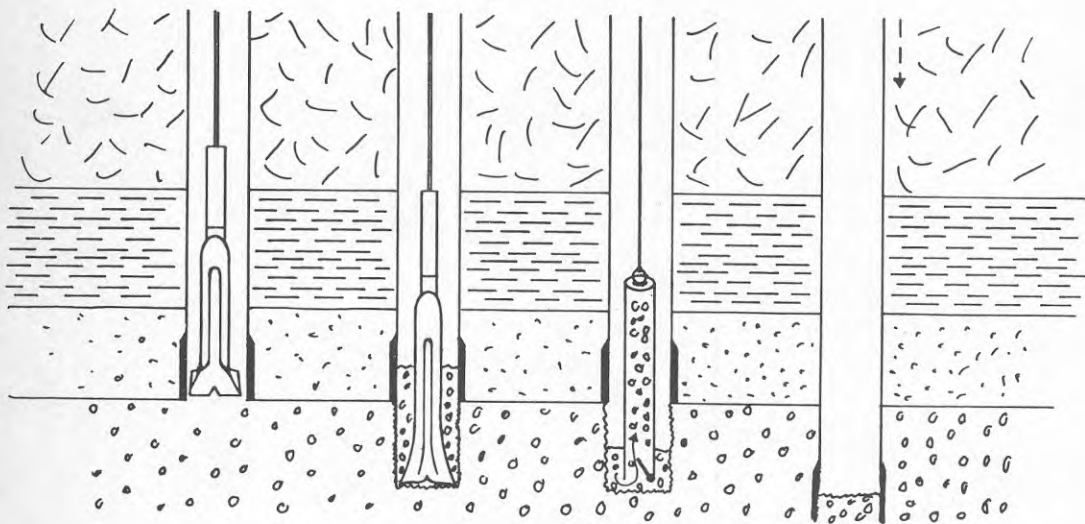
Linstötmetoden anses ge prover med förhållandevis god kvalitet. Förfaringssättet att driva foderrör med samma intervall som rensningen vid borrhning i okonsoliderat material, borgar för att proven verkligen representerar rätta nivåer.

Mejselns aktivitet nere i hålet gör dock att olika lager, i mindre skala sett, blandas med varandra, varvid lagergränser och andra detaljer i lagerföljdens uppbyggnad suddas ut. Vidare sker en viss söndermalning som är svår att kvantifiera. Generellt uttryckt är denna dock liten vid borrhning i löst lagrade formationer där endast stora partiklar, block och sten, slås sönder, medan nedkrossningsmekanismen är en förutsättning för nedträngning vid borrhning i hårda formationer. I det sistnämnda fallet består borrhkaxet av bergartsfragment. Det är då endast fragmen-

ten som kan användas för att okulärt bestämma vilken bergart som genomborrats.

Prover tas vanligen med s k sandpump. Denna består i princip av ett öppet rör som vid uppdragning fås att slutas i nederändan med en platt- eller kulventil. Ibland användes kolvpump, se tidigare figur 6.8. I dessa sugs materialet in i röret.

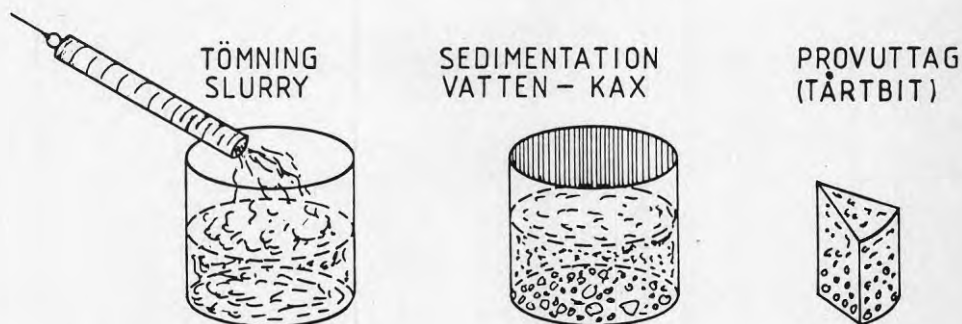
För att sandpumpen skall fungera måste borrhaxet vara blandat med vatten till en s k slurry. Detta innebär att vatten måste tillföras borrhålet vid borring genom torra lager.



Figur 6.49 Ett intervall med nedkrossning, upptagning av kax med sandpump samt drivning av foderrören (O Andersson 1981).

Som figur 6.49 visar tränger slurryn in i sandpumpen vid nedgående rörelse. Då pumpen dras uppåt sluts ventilen och provet stannar kvar.

Väl uppe på marken töms innehållet i ett kärl eller liknande. Suspenderat material kommer att sedimentera på kärlobotten varvid de tyngsta partiklarna faller först och de lättaste sist, se figur 6.50. Vad som erhålls är således ett fraktionerat (sorterat) prov. Det är viktigt att inte dekantera kärlet förrän vätskan blivit klar. I annat fall går finpartiklarna förlorade och ett missvisande prov blir resultatet.



Figur 6.50 Tagning av representativt prov.

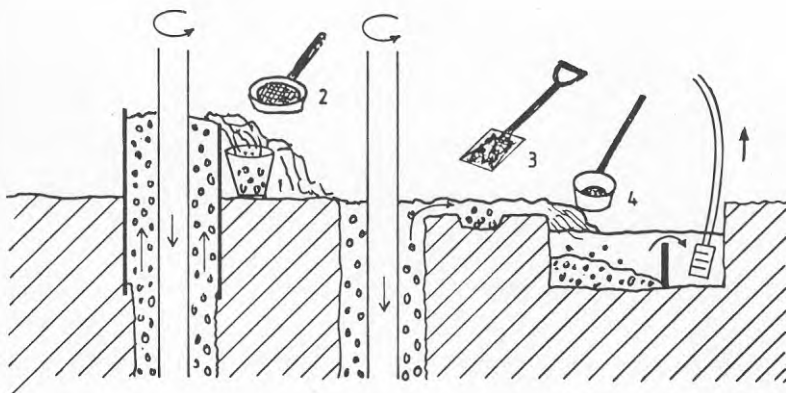
Det prov som erhålls representerar ett visst intervall av lagerföljden. Hur stort detta är beror på med vilken täthet provtagning sker, vilket i sin tur måste väljas med hänsyn tagen till en rad omständigheter bl a ändamålet med provtagningen, rådande geologiska förhållanden och ekonomiska ramar. Det vanliga är att rensa hålet efter 1-3 m borrhning.

6.4.3.2 Provtagning vid rotationsborrning med spolning

Under borrhningen bringas kaxet kontinuerligt till ytan med hjälp av vatten eller vatten med tillsatser, mudd. Antingen strömmar det kaxförande spolmediet mellan borrhör och borrhållsvägg (direktspolning), se figur 6.16, eller också inuti borrhören (omvänd spolning) såsom figur 6.32 visar. Väl uppe på markytan avskiljes kaxet från spolvätskan, normalt genom passiv sedimentation i först en spolränna och sedan i en sedimentations- eller spol-

bassäng. Någon gång används ett skiktnät för att avskilja de grövsta kaxpartiklarna innan sedimentationsbassängen.

Prover tas direkt från skiktnät, spolränna eller bassäng, i de två sistnämnda fallen med spade eller liknande. Ibland tas ett helt spolprov i spann eller kärl, figur 6.51 visar några alternativa provtagningsätt. Tagning av spolprov innebär att provet först måste ges tid att sedimentera innan dekantering, dvs enligt samma princip som vid linstötbörning.



Figur 6.51 Några i dag vanliga provtagningsätt vid direktspolning (O Andersson 1981).

1. Spolprov i hink.
2. Kaxavskiljning i siktnät.
3. Prov med spade från sandfälla i spolränna.
4. Prov med kärl från botten på sedimentations/spolbassäng.

Redan själva provtagningen vid markytan har sina uppenbara felkällor. För att förstå vad proven trots detta representerar måste kaxproduktionen betraktas från den stund det bildas och fram till dess provtagning och kaxbedömning sker.

Vad som bestämmer kaxets sammansättning och utseende är en primär funktion av formationsuppbyggnaden och dess egenskper. Sekun-

därt inverkar borrkronans funktion och kondition liksom rent borrarstekniska parametrar med tryck på borrkrona, rotations-hastighet och spolningstryck i främsta rummet.

Lösa sedimentära formationer som ej binds av starka kohesiva krafter bildar kax bestående av ursprungliga byggelement. Sålunda bildas sand av en lös sandsten liksom av en kvartär sandformation. Vidare kommer en morän att ge upphov till både silt-, sand- och grusfraktioner. Block och större stenar mals vanligen ned till grusfraktion. Borrar genom exempelvis en rullstensås ger i stort en blandning av sand- och grusfraktioner.

Lerformationer och i viss mån silt bryts till sjok eller klumpar som i vart fall inledningsvis hålls samman av kohesionskrafter. Under transporten upp genom borrhålet löses emellertid klumparna upp helt eller delvis och silt- och lerpartiklarna går i suspension i spolvätskan. Detsamma gäller också moränleror.

Hårda sedimentära formationer (sandsten, skiffer, kalksten) samt kristallin berggrund (granit, gnejs, grönsten etc) krossas till mer eller mindre stora fragment och/eller mals till "mjöl". Vad som bestämmer fragmentens storlek beror bl a på bergartens hårdhet, korn- eller mineralstruktur och surhetsgrad för att nu nämna några parametrar. Den teoretiska kaxbildningen har sammanställt i figur 6.52.

UTGANGSMATERIAL	KAXET KOMMER UPP SOM		
	URSRPUNGLIGA BYGGELEMENT (FRAKTION)	GROVKROSS- OCH SKJUV-PRODUKTER (MÄNGD)	FINKROSS-PRODUKTER "MJÖL" (MÄNGD)
A LÖSA OCH HALV-FASTA FORMATIONER			
Lersediment	(L), (Si)	Rikl klumpar	-
Silt sediment	Si	Bet-obet klumpar	-
Sandsediment	Sa, (Gr)	-	-
Grussediment	Gr, Sa	Obet fragm	-
Steniga grovsediment	Gr, Sa	Bet fragm	Obet
Moräner	Si, Sa, Gr	Bet fragm	Obet
Moränleror	(L), Si, Sa (Gr)	Rikl klumpar	-
Lersten	(L)	Rikl fragm	-
Siltsten	(Si)	Rikl fragm	-
Sandsten, sandkalksten	Sa	Enst fragm	-
Kritkalksten	-	Rikl fragm	Bet
B FASTA FORMATIONER			
Lerskiffer	-	Rikl fragm	Obet
Siltsten	-	Rikl fragm	Obet
Sandsten	-	Rikl fragm	Obet
Kalksten-kristallin	-	Rikl fragm	Bet
Kristallina bergarter såsom granit, gnejs, porfyr, diabas, grönstenar	Enst mine-ralkorn i främst sand-fraktion	Rikl-bet fragm	Bet-Rikl

Figur 6.52 Kaxbildning med hänsyn till olika jord- och berglager. Parantes anger liten mängd (O Andersson 1981.

L = Lera

RIKL = rikligt

Si = Silt

BET = betydligt

Sa = Sand

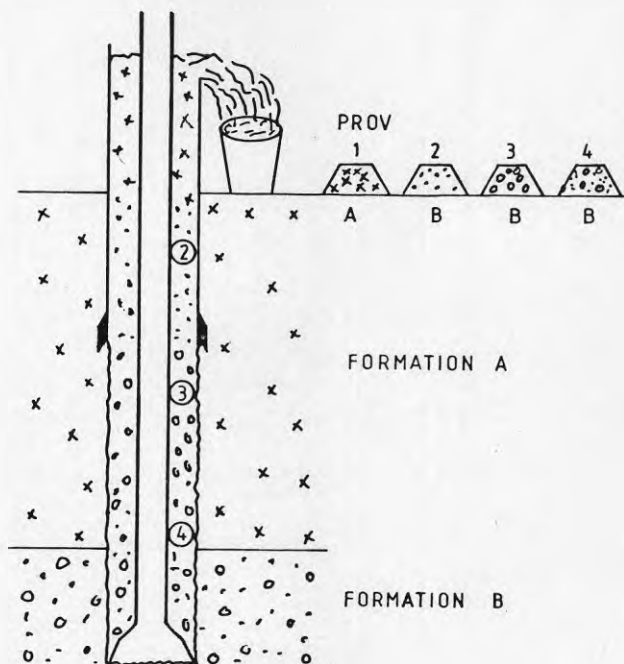
ENST = enstaka

Gr = Grus

OBET = obetydlig

FRAGM = fragment

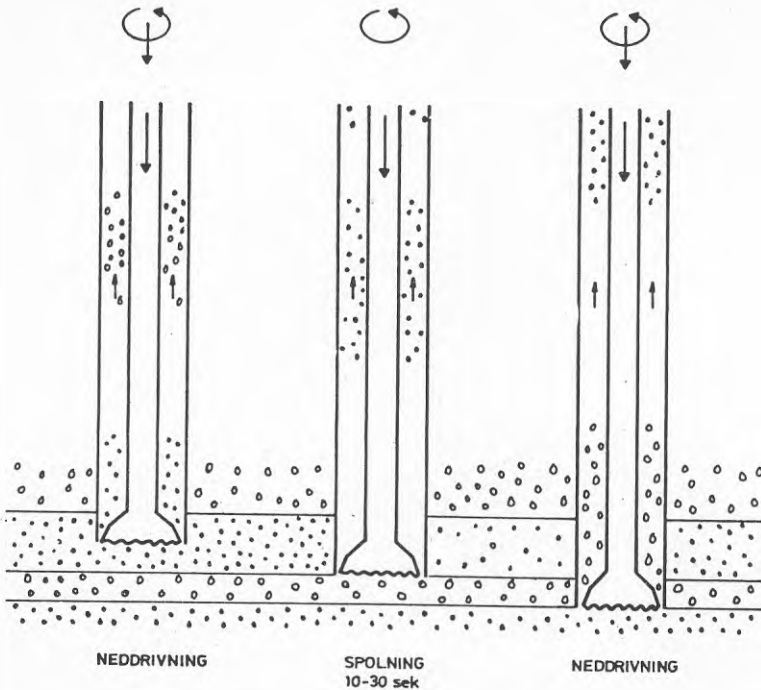
Under transporten sker en sortering efter partikelstorlek, form och densitet, (O. Andersson 1981). De lättare mindre partiklarna når markytan fortare än de större eftersom spolvätskans lyftförmåga inverkar olika. Som figur 6.53 visar kan detta ge upphov till feltolkningar av lagerföljden.



Figur 6.53 Sortering under upptransport. Skenbar lagerföljd framgår av provhögar, där proverna 2 och 3 har fraktionerats ut ur formation B (O Andersson 1981).

Ett sätt att minska sammanblandning av borrkax från olika nivåer är att utföra borrhningen stötvis. Först borra exempelvis en meter och därefter göra ett kort uppehåll (10-20 sek) före nästa meter påbörjas. Förfaringsättet har prövats med gott resultat. Det stötvis uppkommande borrkaxet kan på detta sätt, som figur

6.54 visar, bättre knyts till en bestämd nivå i borrhålet.



Figur 6.54 Principen för separerad kaxtransport (O Andersson 1981).

Inte bara sortering under upptransporten stör provet. Oinfodrade borrhållsväggar abraderas av den förbipasserande borrhvatskan och partiklarna från en redan genomborrad formation kan således komma att ingå i provet. Likaledes kan de roterande rören slå eller skava loss partiklar från hållväggen.

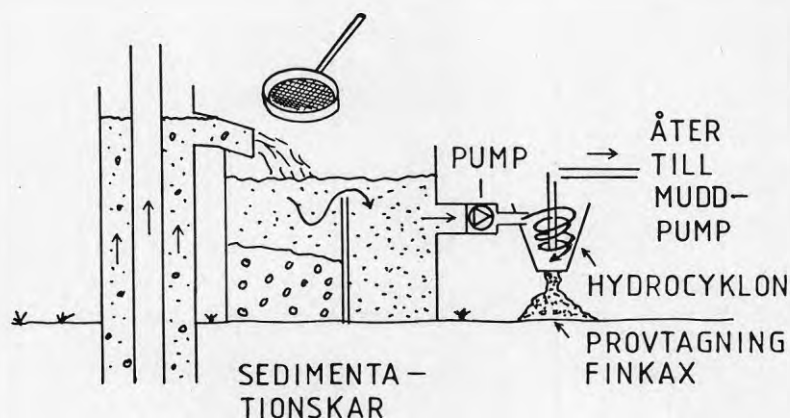
Användande av mudd (vatten med tillsats av ett viskositetsförhöjande medel) gör att partikelstorlekar minskar väsentligt. Dessutom byggs en skyddande muddkaka upp runt borrhållsväggen vilken stabiliserar svaga partier och samtidigt utgör skydd för spolvatten- och borrhörserosion.

Nackdelen med mudd, ur provtagningsynpunkt, är att det blir betydligt svårare att skilja kaxet från spolvätskan samt att proven måste tvättas innan bedömning.

De partiklar, huvudsakligen ler- och siltfraktioner, som inte kan separeras genom sedimentation kommer att ingå i den cirkulerande spolningen. Förutom att de är en felkälla vid provtagning utgör det också en slitagefaktor. Om inte detta cirkulerande material betraktas finns en uppenbar risk för missbedömning av ett taget prov. Om exempelvis en lös enskornig sandsten genomborras med ler- och silthaltig spolvätska kommer det spolprov som tas ut att förutom sandkornen även innehålla lera och silt. Detta kan exempelvis leda till en felaktig dimensionering av filter.

Man kan rensa en spolvätska från cirkulerande finpartiklar med hjälp av hydrocyklon eller centrifugalsikt, se figur 6.55. Sådana används emellertid inte i Sverige men är under utprovning.

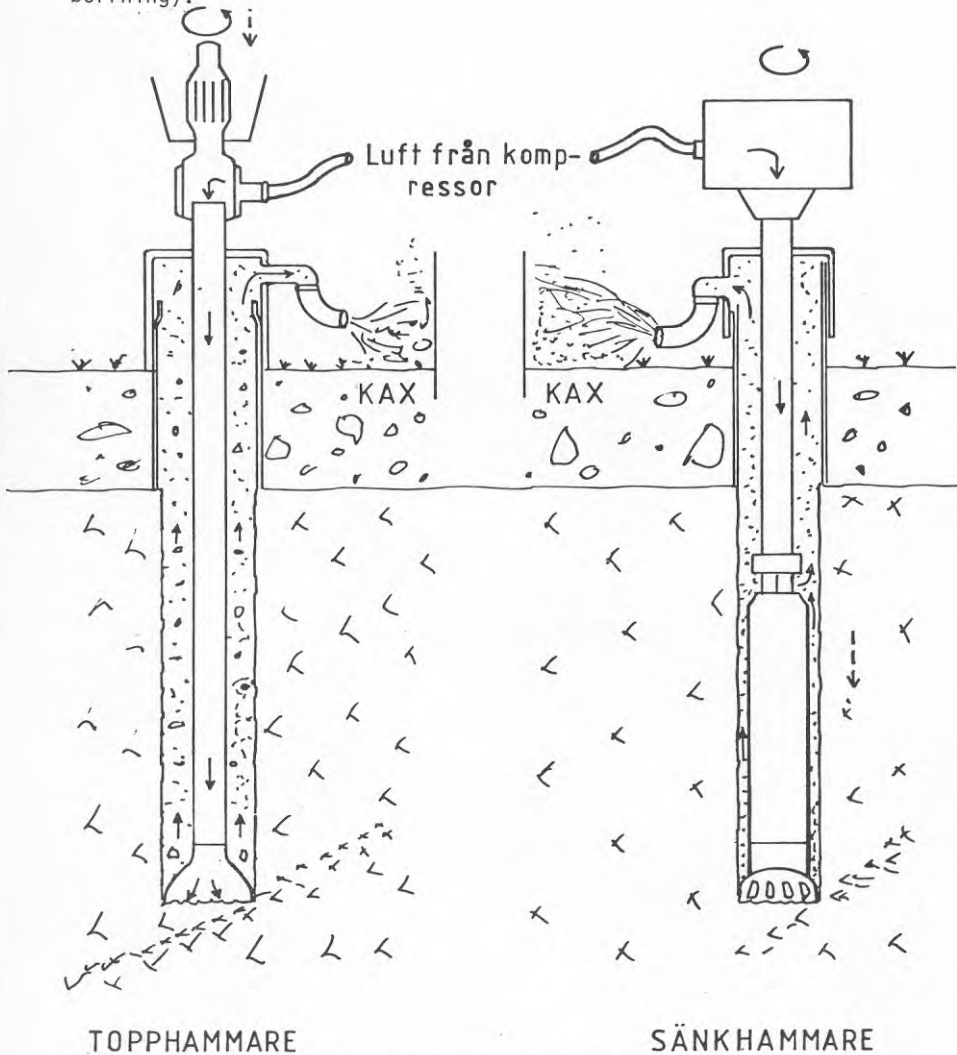
PROVTAGNINGSGROVKAX



Figur 6.55 Grovavskiljning med siktnät och finkaxavskiljning med hjälp av hydrocyklon (O Andersson 1981).

6.4.3.3 Provtagning vid hammarborrning
Rotationsborrning med luft/skumspolning

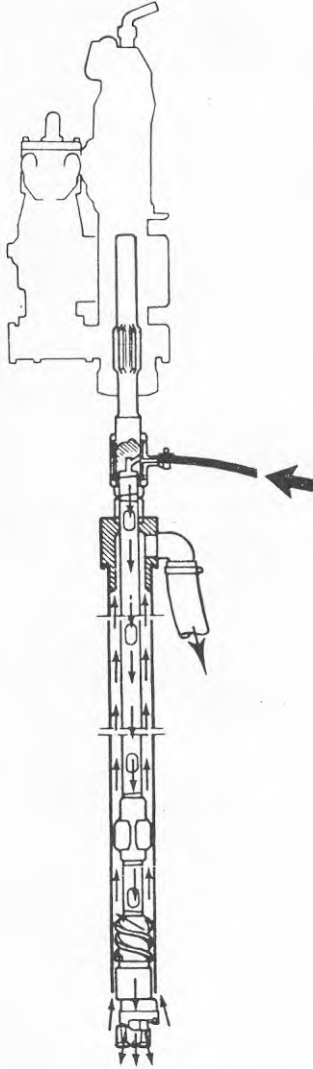
Att transportera upp borrkax med hjälp av tryckluft (ibland med skumtillsats) förknippas i Sverige främst med hammarborrning utan foderrör i fast berg och med foderrör i jordlager (OD-ODEX-borrning).



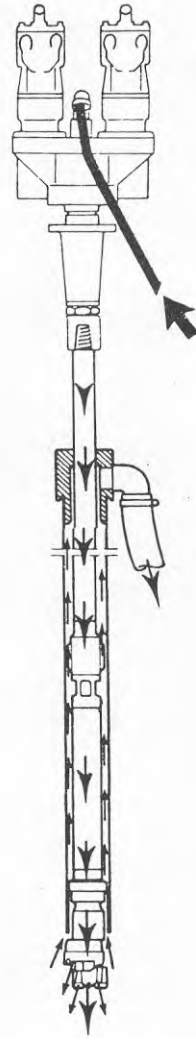
TOPPHAMMARE
SÄNKHAMMARE
Figur 6.56 Kaxtransport vid topp- respektive sänkhämjarborrning.
(O Andersson 1981).

De bästa möjligheterna att få prover med god kvalitet erbjuds vid hammarbörning med topphammarmatning, figur 6.56. Som figuren visar sker en direkt upptransport av kax utan några hinder på vägen upp. Vid sänkhammarbörning utgör däremot själva hammaren en passage som stör upptransporten. Det trånga utrymmet mellan hammare och hålvägg kan medföra att grova kaxpartiklar hindras komma upp. Kaxet kan också anrikas på hammaren där luft-hastigheten minskar. För att undvika fastkilning och andra borrh-tekniska svårigheter brukar borrharen därför renblåsa hålet med jämna mellanrum genom att lyfta och sänka hammaren några gånger. Det kax som då kommer upp till markytan är en blandning som representerar hela det genomborrade intervallet mellan varje renblåsning.

Vid ODEX-börning, figur 6.57, fås visserligen inga störningar på grund av hålväggserosion eftersom foderröret förhindrar detta. Å andra sidan innebär nere-i-hålet-utrustningen flera svåra kaxpassager. Bland annat filtreras grova kaxpartiklar bort av ODEX-utrustningens sildel. Vid sänkhammarbörning utgör dessutom returspolningskanalerna genom slagöverföringsskuldran ytterligen en trång passage. Det kax som slutligen når markytan är därför i viss mån filtrerat men också blandat från olika nivåer.



TOPPHAMMARE

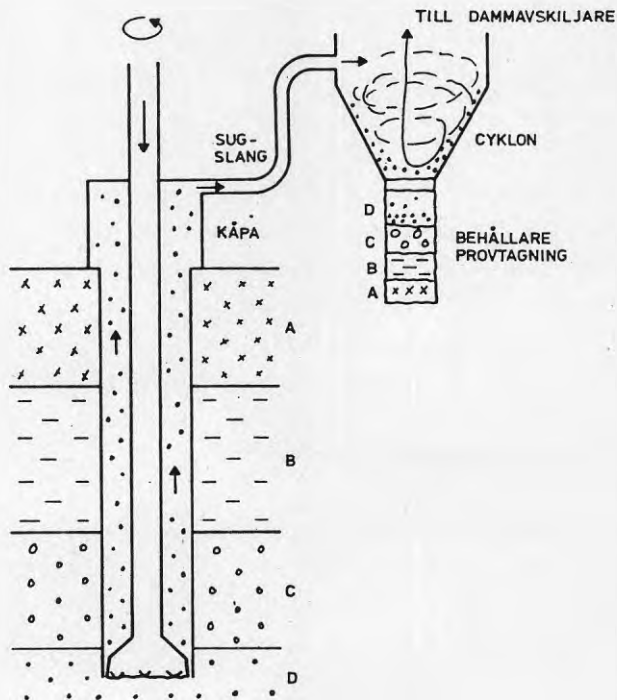


SÄNKHAMMARE

Figur 6.57 Luft- och kaxtransport vid ODEX-borrning med topp- respektive sänkhammarbörning (Atlas Copco 1975).

De flesta borrtrusningar för luftspolning har någon form av anordning för kaxuppsamling vid utblåset. Nästan alla utrustningar har en s k dammsugare. Denna består i princip av en sugkåpa träd över borrhålet, varifrån kaxet sugts upp via en slang till en cyklon och dammskiljare. Här separeras först de grövre partiklar från luften och kaxet får falla ned i en behållare. Det fina dammet tas i en filteravskiljare.

Dammsugarna har främst utvecklats för att förebygga silikos (Stendamslunga) och i övrigt för att ge bättre arbetsmiljö, men på köpet kan dammsugaren också användas för provtagningsändamål, eftersom de partiklar eller det damm som successivt faller ned i behållaren omvänt avspeglar den lagerföljd som genomborras, se figur 6.58.



Figur 6.58 Behållaren på luftcyklonen visar den inventerade lagerföljden (O. Andersson 1981).

Metoden har emellertid en stor begränsning. Den fungerar endast då borrning sker i torra jord- och berglager. Så fort ett vattenflöde eller vattenhållande lager påträffas förändras provtagningsmöjligheterna högst avsevärt. Dammsugaren är då inte längre brukbar och det blöta eller vattenblandade kaxet får nu istället blåsas ut antingen fritt ur borrhålet eller också samlat i ett avledningsrör eller slang.

Vid borrning i finkorniga lösa formationer som finsand, silt och lera uppstår rent borrarstekniska svårigheter till följd av utflytning och pluggning i hålet. Detta gör att prover dels är svåra att ta och dessutom blir svårbedömbara.

Betydligt bättre provtagningsmöjligheter erbjuds vid borrning i vattenförande hårda formationer, exempelvis sprickig granit eller fast porös sandsten. Vatteninträngningen till borrhålet blir då oftast så stor att kaxet suspenderas och mer eller mindre vattenspolas upp ur hålet. Prover kan då avskiljas vid avledningsröret i siktnät, spann eller liknande.

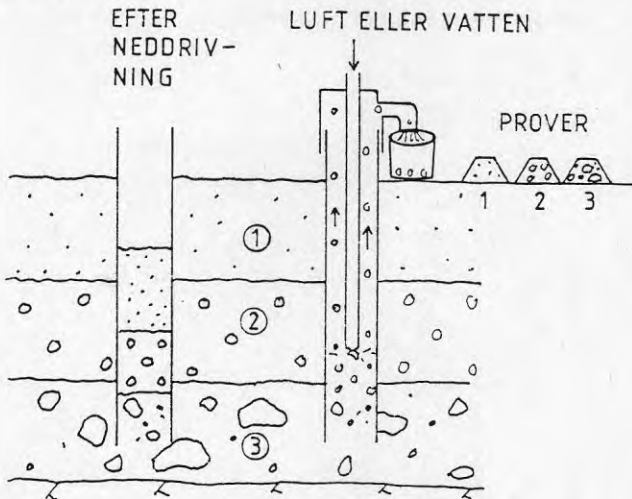
Sammanfattningsvis kan konstateras att förutsättningarna för provtagning då luft användes som bas för kaxtransporten varierar avsevärt dels med utrustning och borrarb metod och dels med geologiska förhållanden. Det fordras därför god kännedom om den borrarsteknik som används och viss känsla för vad som händer nere i hålet för att rätt kunna bedöma kaxproven.

6.4.3.4 Provtagning vid rördrivning

Rördrivningen används som metod dels i samband med kartläggning (Rekognoseringsborrning) dels för att erhålla mätpunkter vid propumpning (observationsrör) och slutligen som provtagningsmetod inför brunnprojekteringen.

Provtagning sker genom att låta jordmaterialet tränga in i röret antingen genom öppen rorbotten eller genom perforeringar i nedre

rörändan. Med jämna mellanrum rensas sedan röret med hjälp av vatten eller tryckluft.

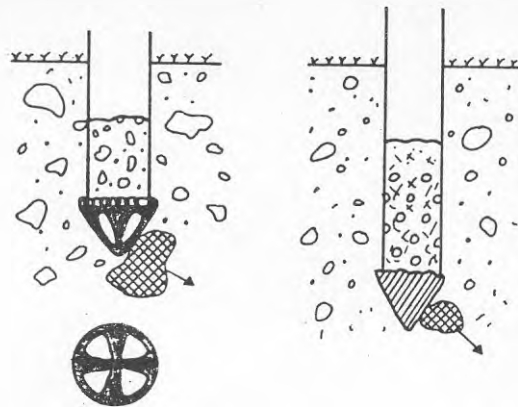


Figur 6.59 Provtagning vid rördrivning med öppet rör (O. Andersson 1981).

Vid inträngning i öppet operererat rör bibehålles lagerföljden i inträngningsskedet. När rensningen sedan görs fås materialet till ytan så att skiftningar i lagerföljden är detekterbara, se figur 6.59.

En nackdel med det öppna röret är att hålet kan blockeras av exempelvis en mindre sten. Detta undviks om rörändan utformas som en spets med exempelvis fyra inträngningshål, s k "krysspets", se figur 6.60, vilken visat sig ge prover med god representativitet. Spetsen kan som figuren visar, också vara helt sluten och inträngningen av jordmaterial fås då istället via ett stort antal perforeringar, vanligen i rörets nedre del ca 1 m.

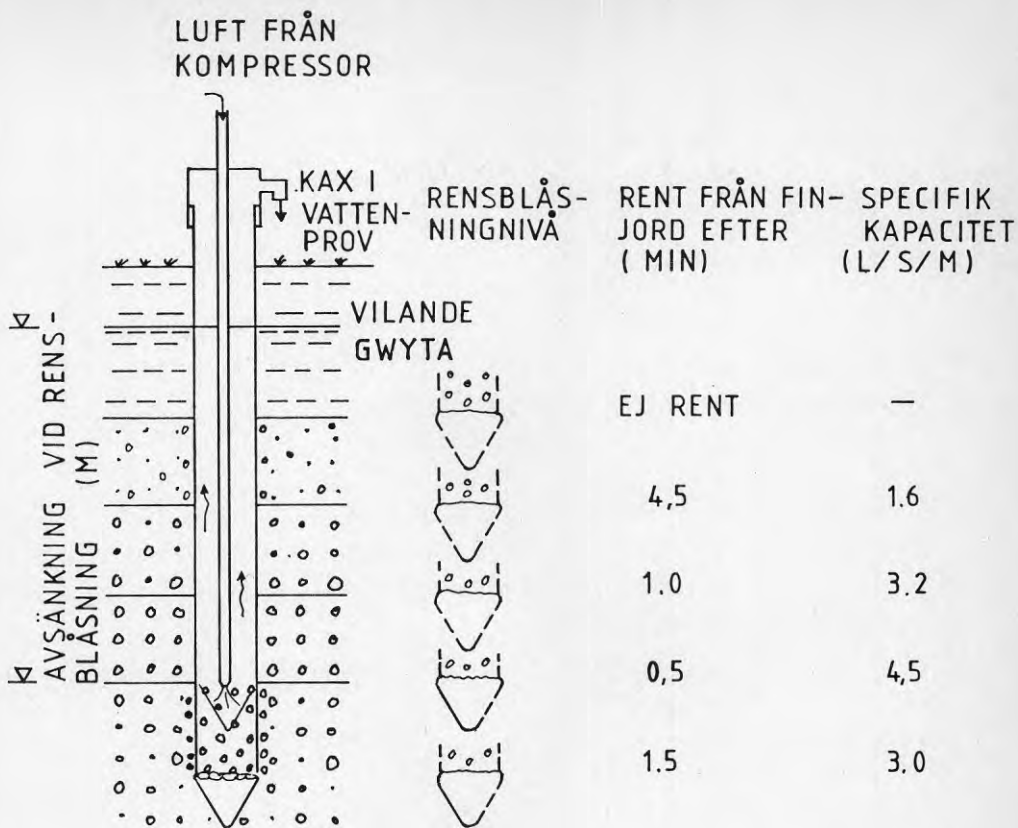
Perforeringarnas storlek väljes efter förväntad kornstorlek. Ju grovkornigare formation ju större hål. Vanligen används 2 mm i finkorniga formationer och upp till 8 mm i grovkorniga. Det ligger alltså i provtagningsättets natur att de grövsta kornen blir underrepresenterade i provet.



Figur 6.60 Med s k krysspets och slutna spets med perforeringar trängs blockerande stenar och mindre block undan (O. Andersson 1981).

Det material som kommer in i röret via perforeringarna blir allt efter omständigheterna mer eller mindre sammanblandat. Även om det perforerade röret med slutna spets ger prover med sämre representativitet än det öppna röret eller krysspetsen har det perforerade röret ett par andra fördelar.

Både den mekaniska och hydrauliska kontaktytan mot jordlagren blir förhållandevis stor. Detta innebär att det under rördrivningens gång finns möjligheter att testa olika avsnitt i formationen. Dels kan man vid rensblåsning (alternativt spolning) se hur fort vattnet blir rent. Detta ger en direkt fingervisning om halten permeabilitetsnedsättande finjordhalt, figur 6.61, dels kan varje avsnitt testas avseende specifik kapacitet uttryckt som erhållen vattenmängd per tidsenhet och antagen avsänkning. I samband med sådan test kan också vattenprov med god representativitet tas.



Figur 6.61 Det perforerade rörets möjligheter för dokumentation av jordlageruppbyggnad samt lagrens hydrauliska egenskaper.

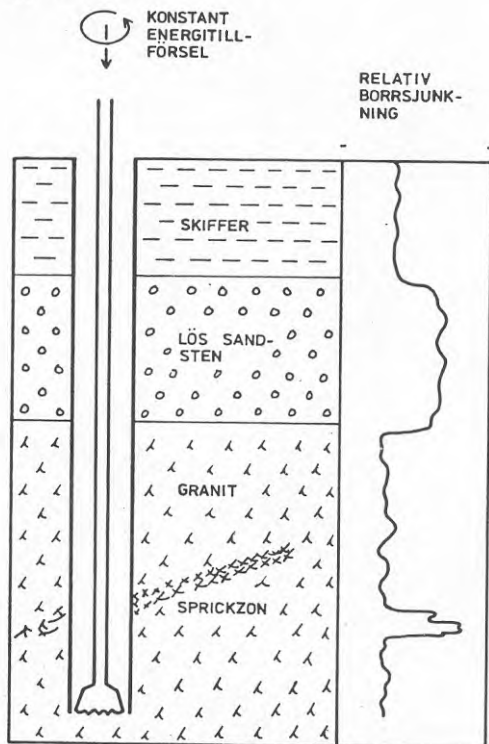
Då rördrivningen sker under grundvattennivån är jordmaterialet som blåses eller spolas upp blandat med mer eller mindre stora mängder vatten (vid vattenuppspolning även över grundvattennivån). Det är då av vikt att provtagningskärlet får stå så lång tid innan dekantering att vattnet blir klart. På så sätt kommer även finjordpartiklarna med i provet. Just finjordshalten är av största betydelse vid dimensionering av ett brunnsfilters slitsvidd.

6.4.4 Registrering av borrsjunkning

För att sönderdela eller tränga undan en viss jord- eller bergart

åtgår det en bestämd mängd energi. Denna tillföres via borrarutrustningen. Ju större motstånd jord- eller bergarten gör mot sönderdelningen eller undanträngningen ju större energimängd måste tillföras per borrarlängdsenhet om borrets sjunkhastighet skall hållas konstant. Om man å andra sidan låter energitillförseln vara konstant kommer istället sjunkhastigheten att variera med borrhingsmotståndet. Genom att mäta sjunkhastigheten vid konstant matningstryck kan således siffervärden över jordens eller bergets borrbarhet erhållas. Borrbarheten ger sedan ett mått på jord- och berglagrens samlade egenskaper. (O. Andersson 1981).

I berg får man exempelvis en snabb borrsjunkning i lös sandsten, medan en granit ger betydligt lägre borrsjunkningsvärde. Öppna sprickor i samma granit ger däremot självfallet extremt hög borrsjunkning, se figur 6.62.



Figur 6.62 Principiellt exempel på borrsjunkningens beroende av olika bergformationers borrbarhet.

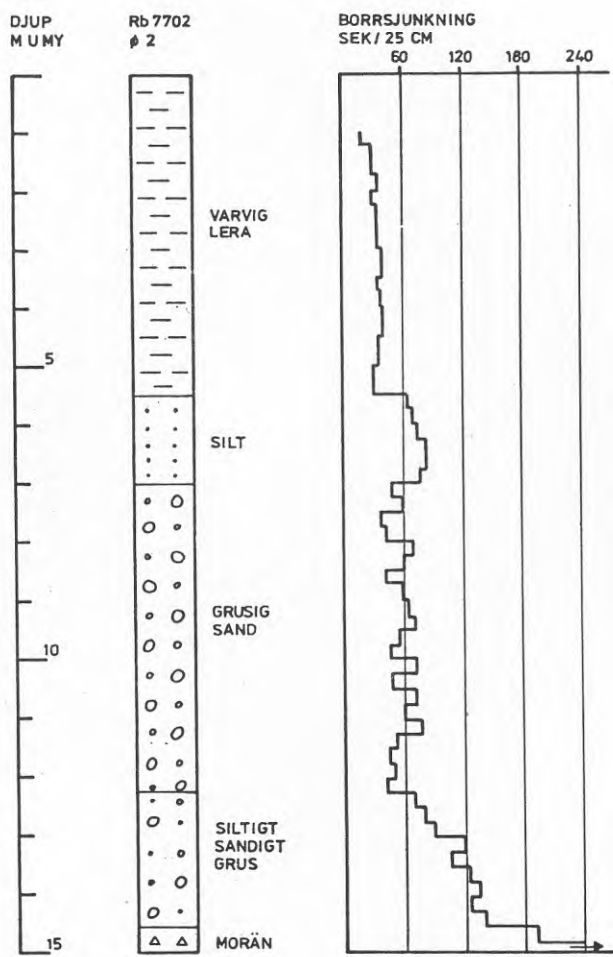
Ur grundvattensynpunkt är detta särskilt intressant därför att just sprickor i kristallint berg och porösa lösa lager i sedimentärt berg ger förutsättningar för stora grundvattenuttag. Att registrera borrsjunkning vid borrning i berg är därför ett bra komplement till provtagningen.

Vid borrning i jordlager spelar jordparametrar som kornstorlek, porositet, lagringsrärhet och vattenhalt avgörande betydelse för borrsjunkningen. Figur 6.63 visar ett exempel på borrsjunkningsregistrering vid rördrivning. Här avspeglas varje lagerenhet väl i borrsjunkningskurvan och lagergränserna har bättre kunna fastställas än om enbart provtagningen bildat underlag för profilen.

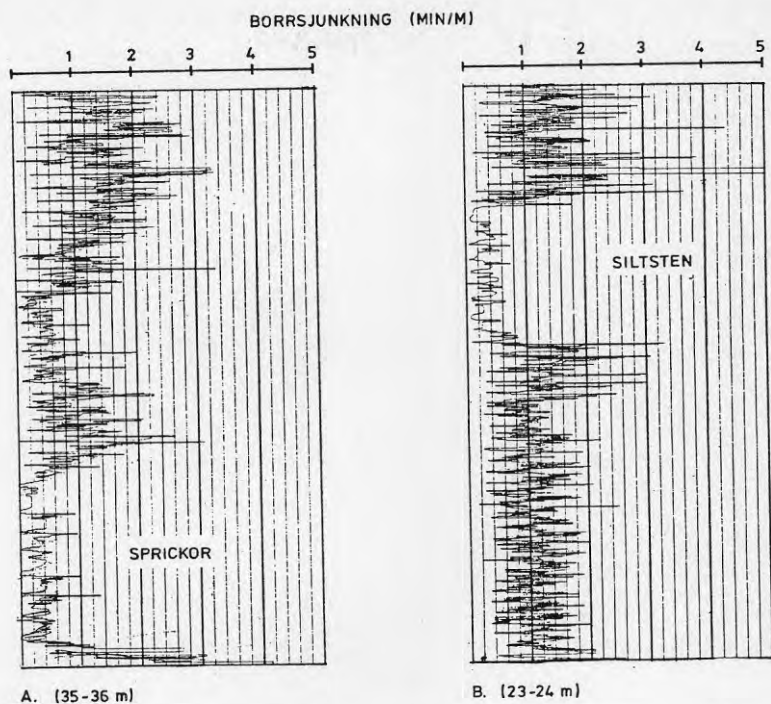
Registrering av borrsjunkningen förekommer dessvärre mycket sällan i Sverige. De borrprotokoll som skrivs i fält innehåller mestadels endast enstaka noteringar som "hårt" och "löst".

Det är emellertid relativt enkelt att mäta borrsjunkningen manuellt, exempelvis genom att med klocka ta tiden för varje meters borrning eller 25 cm som gjorts i exemplet i figur 6.63.

Mer sofistikerat är att använda en självregistrerande borrsjunkningsmätare. Metoder härför är under utveckling i Sverige. Figur 6.64 ger exempel på registrering av lagergränser och sprickor vid hammarborrning utförd med en kontinuerligt registrerande borrsjunkningsmätare.



Figur 6.63 Ett verkligt exempel på då borrsjunkningen avspeglar lagerföljden vid rördrivning (O. Andersson 1981).



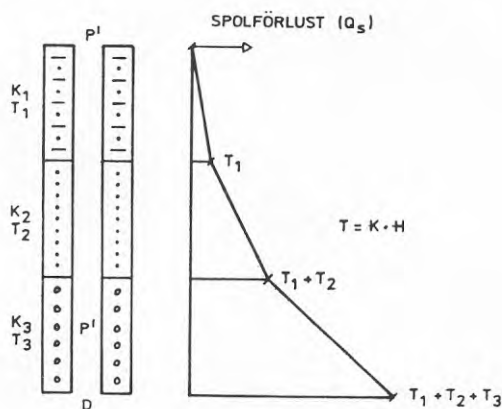
Figur 6.64 Borrsjunktionsdiagram som visar (A) vattenförande sprickzon i sandsten. Hammarborrning (O. Andersson 1981).

6.4.5 Registrering av spolförluster

Vid rotationsborrning med direktspolning, i viss mån även omvänd spolning, finns möjligheter att registrera hur stor del av spolvätskan som trycks ut genom borrhållsväggen. Att mäta dessa s k spolförluster fyller två funktioner, dels en rent borrteknisk sådan och dels en dokumentationsteknisk. (O. Andersson).

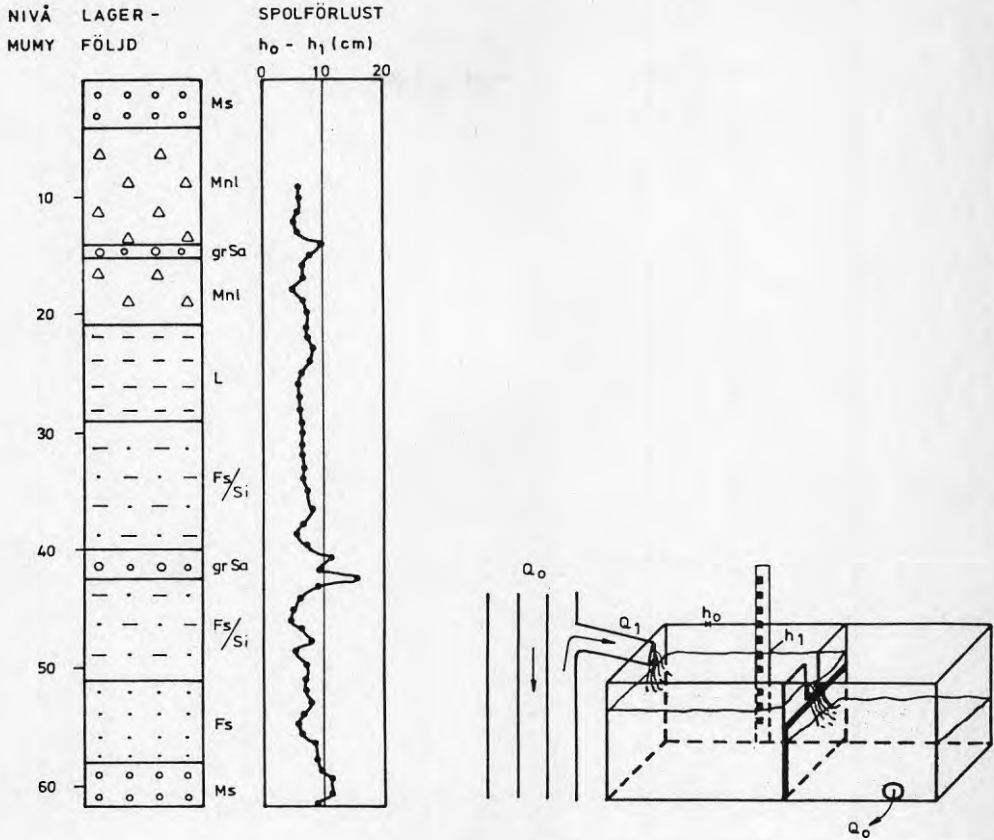
Vi skall här se närmare på hur spolförluster kan vara ett hjälpmedel att dokumentera permeabla zoner i den lagerföljd som genomborras.

Schematiskt uttryckt ökar spolförlusten med ökad permeabilitet (genomsläpplighet) och inströmningsyta. Den permeabla faktorn kan sägas påverkas av dels porutrymmen och dels sprickor. Den teoretiska spolförlusten kan bedömas enligt figur 6.65.



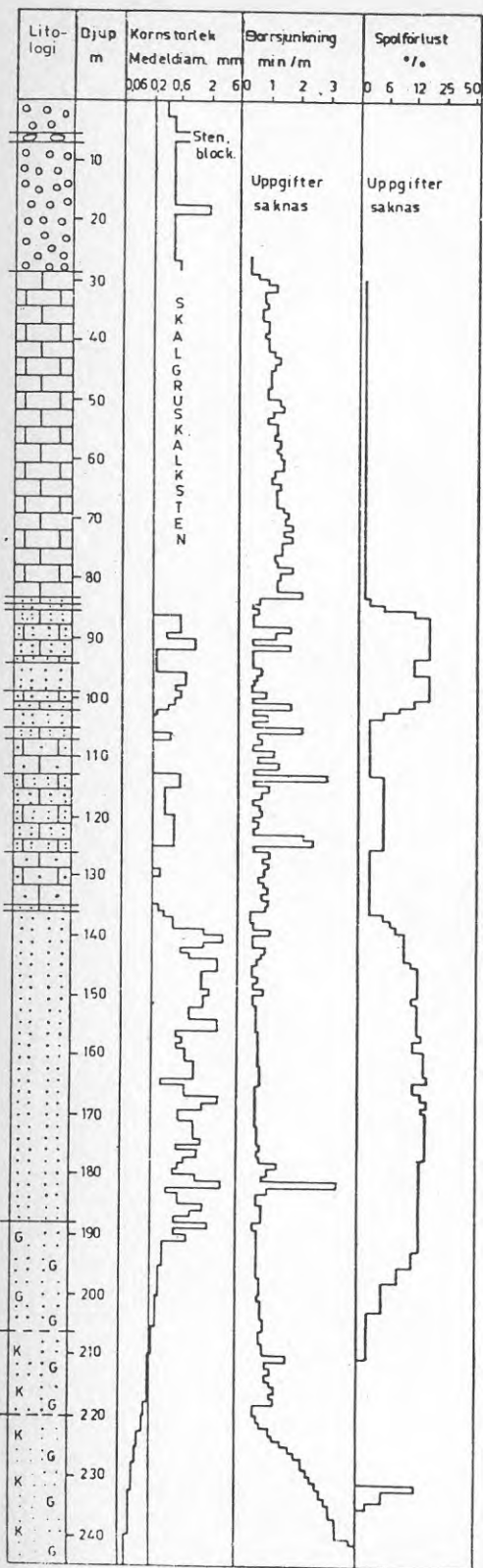
Figur 6.65 Teoretisk spolförlust (Q_s) vid borrning genom tre lager med olika permeabilitet (K), och transmissivitet (T) under konstant övertryck i borrhålet (P') (O. Andersson 1981).

I praktiken styrs spolförlustens storlek och förlopp av flera samverkande faktorer, där bl a spolvattentryck, spolvätskans viskositet inklusive finmaterial i suspension, kornfördelning och lagerföljd i genomborrat material, packning- och konsolideringsgrad, borrhålets djup och tillsats av stabiliseringsmedel spelar en betydande roll. Trots detta visar försök som gjorts att metoden är användbar. Ett exempel härpå ges i figur 6.66. En bestämd mängd spolvatten (Q_0) pumpas ned genom stängerna och med en mätsticka i sedimentationskaret mäts mängden tillbakakommande vatten (Q_1). Spolförlusten anges sedan som en nivåförändring i karet ($h_0 - h_1$).



Figur 6.66 Resultat av spolförlustmätning vid rotationsborrning genom jordlager (Borrning vid Löddeköping i Skåne 1971). (O. Andersson 1981).

Det går således att med relativt enkla metoder mäta spolförlusten och på det viset förhöja kvaliteten på en dokumentation som görs under borrningens gång. Spolförlustparametern blir i detta perspektiv en lika viktig pusselbit i dokumentationen som provtagning och borrsjunkningsmätning. Parametrarna sammantaget ger en mycket god bild av lagerföljden och lagrens hydrauliska egenskaper, något som framgår av figur 6.67. Med resultaten från denna undersökningsborrning gjordes senare en brunn med en kapacitet runt 200 l/s.



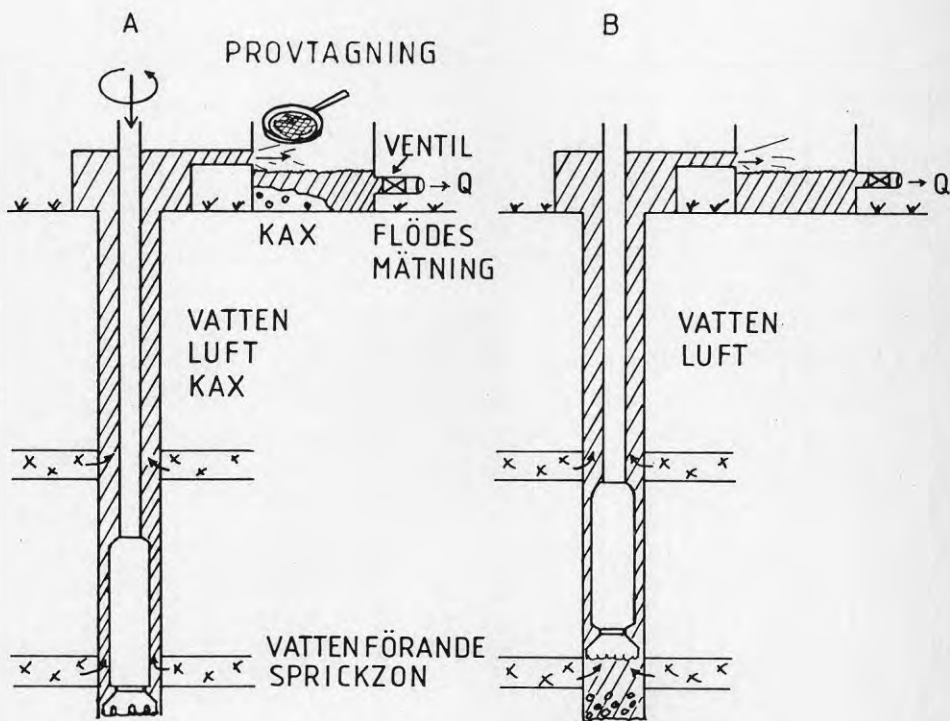
TECKENFÖRKLARING

-  Sand
-  Sten, block
-  Kalksten
-  Sandkalksten
-  Kalksandsten
-  Sandsten
-  Glaukonitsand
-  Kaolinblandad glaukonitsand
-  Mosten med glaukonit och kaolin

Figur 6.67 Resultat av undersökningsborrning baserat på provtagning samt registrering av borrarjunkning och spolförluster vid rotationsborrning med direktspolning (Borrning på Kristianstadslättan 1973 (O Andersson 1981)).

6.4.6 Kontinuerlig produktionstest

Vid luftspolningsförfarandet (hammarborrning, odexborrning etc) finns inte möjligheterna att mäta spolförluster. Eftersom luftspolningen, förutom kax, också avbördar det vatten som strömmar till hålet genom sprickor och porer, ges däremot tillfälle att vid markytan mäta avbördningsmängden både under borrningens gång och genom regelrätta mammutpumpningar på vissa intervall. Figur 6.68 åskådliggör förfaringsättet.



Figur 6.68 Flödes- eller kapacitetsmätning vid hammarborrning, (A) kontinuerligt under borrningens gång och (B) kortvarig mammutpumpning på viss nivå.

En viktig aspekt på den kontinuerliga flödesmätningen är också att det ges tillfälle att följa vattenbeskaffenhetens förändring mot djupet.

6.5 Registrering efter borrning

Då man vill undersöka äldre borrhål eller då informationen från ett nytt hål inte blivit fullständig vid själva borrhållstillfället kan s k borrhålsloggning tillgripas.

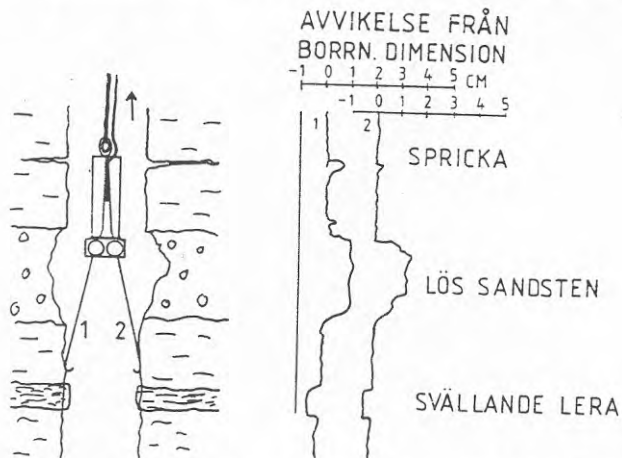
Utomlands är detta relativt vanligt, i Sverige förekommer det sparsamt. Det kan emellertid förväntas att loggningsmetoderna så småningom kommer till bredare användning även i Sverige, i samband med vattenprospektering.

Nedan skall endast några enkla loggningsmetoder för fastställelse av permeabla zoner i färdigställda borrhål beröras.

6.5.1 Diameterloggning

Diameter- eller kaliperloggning som de också kallas består av en mekanisk avkänning med hjälp av fjädrar, spröt eller löphjul.

Vid borrning fås ojämnheter i borrhålsväggen som oftast är relaterad till olika lagringsförhållanden. Exempelvis kommer sprickor att ge utslag liksom lös sandsten och svällande leror, se figur 6.69.

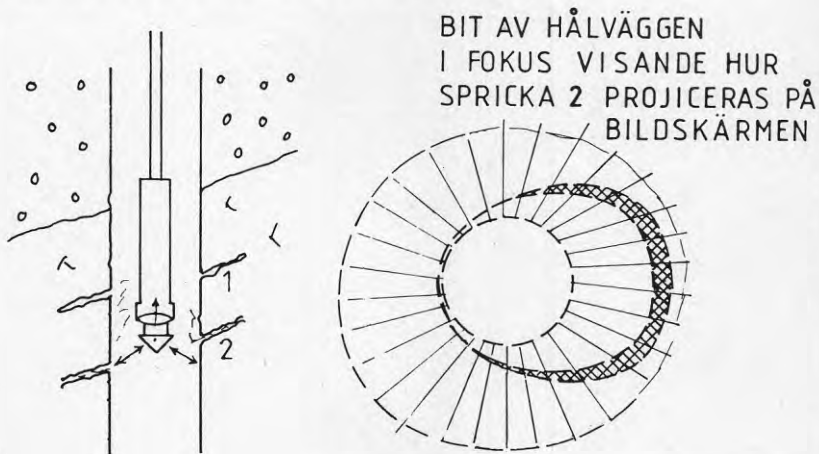


Figur 6.69 Principen för diameterloggning. Exemplet visar system med två fjäderavkännare.

Den lösa sandsten som över- och underlagras av hårdare lager brukar förorsaka stora kaviteter i borrhålet. Detsamma gäller instabila siltstenar. Vid spolborrning kan kavitetsbildning förhindras genom tillsatser av olika stabiliseringsmedel till spolvätskan. Härvid fås en skyddande gelad muddkaka på borrhålsväggen, se tidigare figur 6.26.

6.5.2 TV-granskning

Metoden består av en okulär granskning av borrhålet med hjälp av TV-kamera. Denna har särskilt utformats för att kunna sänkas ned i borrhål och avbilda hela hålväggen, se figur 6.70.



Figur 6.70 TV-granskning av borrhålsvägg. Ett prisma framför kameraögat vinklar strålarna runt väggen så att en tredimensionell bild erhålles. Bilden från väggen spelas ofta in på videoband.

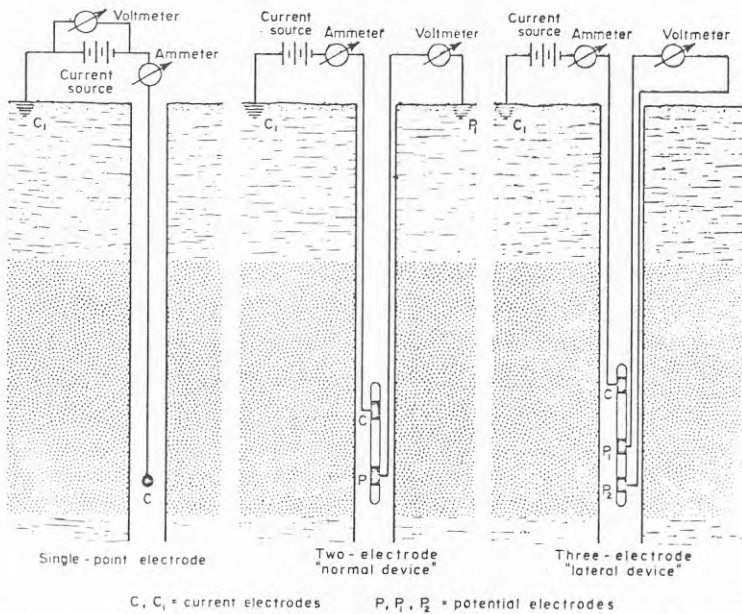
Metoden används mest i kristallint berg för sprickkartering, både kvantitativt och kvalitativt (Bergman 1975). Enda förutsättningen är att vattnet i hålet måste vara klart. Eventuell bormudd måste således vara bortrensad innan loggningen,

TV-kameran kan med fördel också användas för att kontrollera foderrör och brunnsfilter, exempelvis för att spåra korrosions- och igensättningsfenomen.

6.5.3 Elektrisk loggning

De internationellt vanligaste loggningsmetoderna är mätning av elektrisk resistivitet, elektrisk självpotential.

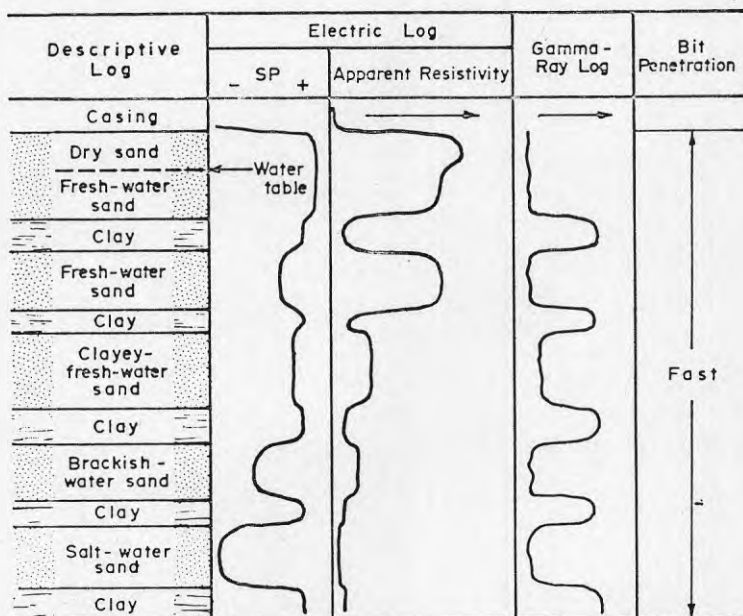
Dessa loggningar ger dels information om själva formationsmaterialen men också om den vätska som fyller por- och sprickutrymmen. Loggningarna vars principiella utrustningsdelar framgår av figur 6.71 kan endast göras i vätskefyllda hål utan foderrör.



Figur 6.71 Några uppställningar för elektrisk loggning (Johnson Div 1975).

Resistivitetmätning ger mycket kraftiga utslag för en sandformation med hög salthalt i porvattnet (låg resistivitet). Å andra sidan visar de flesta lerformationer samma låga elektriska motstånd utan det salta porvattnet.

Självpotentialen som normalt utförs samtidigt med resistivitetsloggen ger en spegelbild av resistivitetskurvan, figur 6.72. Denna är särskilt värdefull på större djup då upplösningen på resistivitetskurvan minskar.

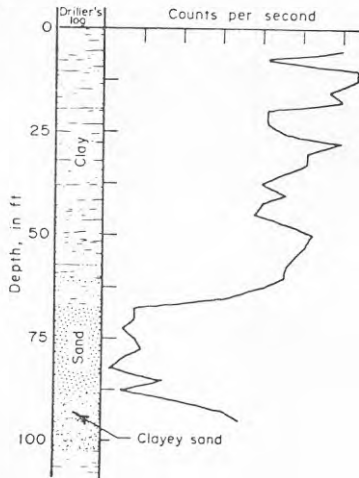


Figur 6.72 Teoretiskt fall där elektrisk loggning ger utslag för sand- och lerformationer samt porvattnets kemiska karaktär. Se även gammalloggens betydelse för detektering av lerlager. (Johnson Div 1975).

6.5.4 Gammaloggning

Vid denna metod används en sond som mäter halten radioaktiva spårämnen, främst förekomsten av kalium 40, uran 238 och thorium 232. Normalt är dessa isotoper anrikade i lerhaltiga jord- och berglager. Vanligen används en detektor typ Geiger Müller-räk-nare.

Mest markanta skillnader i gammastrålningens intensitet fås då grov- och finkorniga sediment växellagrar, figur 6.73. Se även figur 6.72.



Figur 6.73 Gammaloggen visar den radioaktiva strålningen vanligen med störst aktivitet i lersediment (Johnson Div 1975).

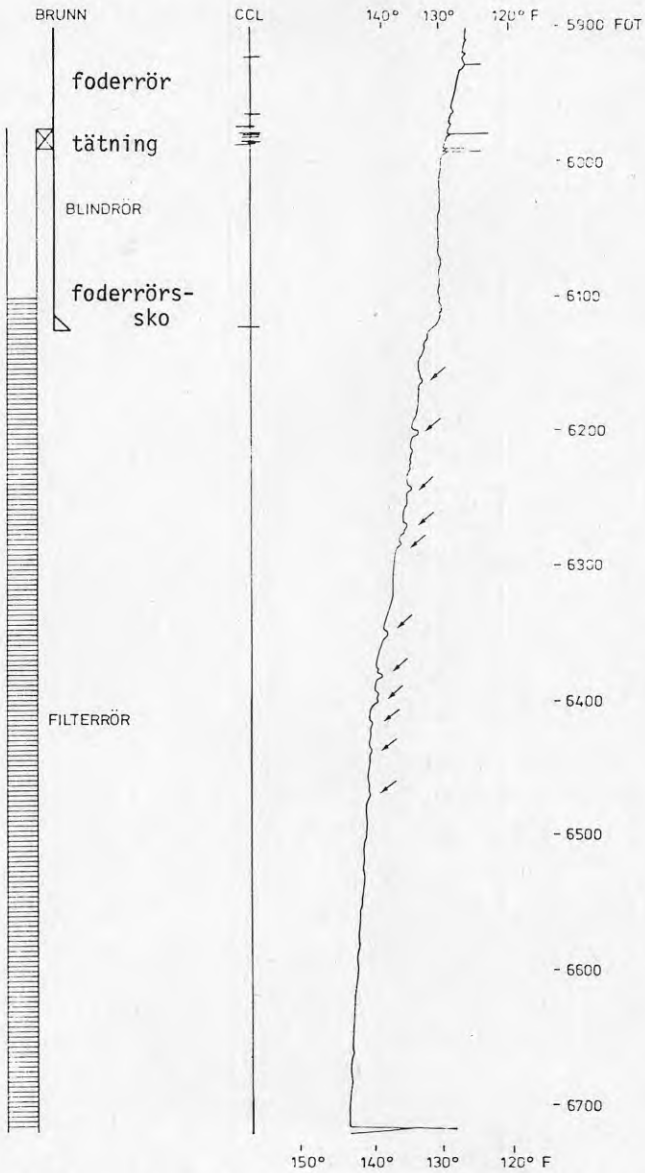
Gammaloggningen ger information om lagerföljden utan hänsyn till porvattnets beskaffenhet, vilket gör att den ofta används som komplement till elektrisk loggning. En styrka med gammametoden är att den också är användbar i infodrade hål.

6.5.5 Temperaturloggning

Vattentemperaturen i ett borrhål som stått ett antal dagar efter borrning anpassas normalt till den termiska gradienten. I sprickzoner och högpermeabla zoner uppstår dock störningar till följd av konvektiva flöden. Genom att kontinuerligt mäta upp temperaturen i borrhålet kan därför vissa inhomogeniteter i borrhålet dokumenteras, figur 6.74.

Som temperaturavkännare används termistorer med hög känslighet, vilka långsamt sänks i borrhålet.

Metoden är också användbar för att t ex studera effekten av cementarbeten i ett hål, vilket kan vara av praktisk betydelse.

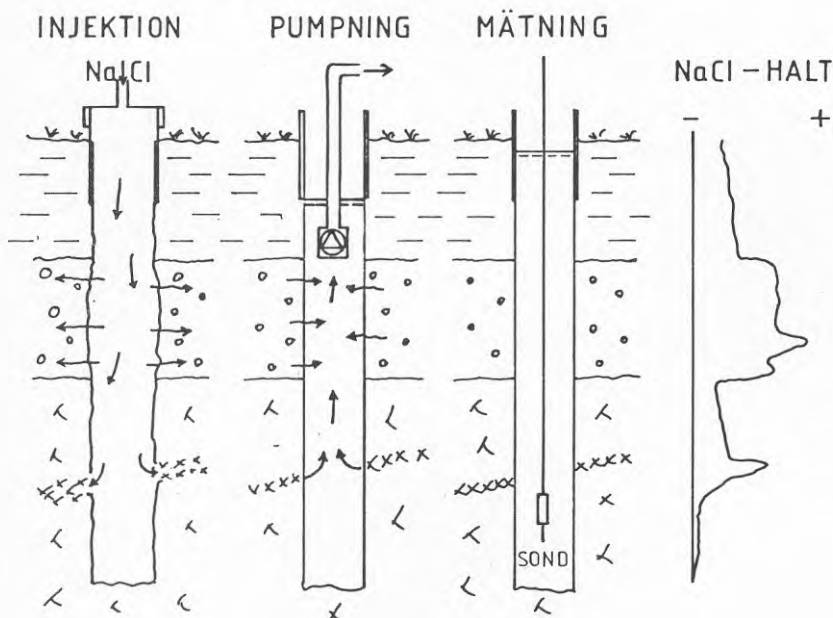


Figur 6.74 Avvikelser i temperaturgradienten till följd av sprickor (pilarna).

6.5.6 Kemisk loggning

Genom att sänka en jonselektiv elektrod ned i ett borrhål kan en valfri kemisk parameter längs vattenpelaren i hålet dokumenteras. Med samma teori som gäller för temperaturvariationer, se ovan, kan på detta sätt vattenrörelser på vissa nivåer i hålet upptäckas.

I grundvattensammanhang är kloridjonen en enkel mätparameter som samtidigt är viktig i beskaffenhetsanalysen. Försök har gjorts att injicera en kloridlösning i ett borrhål och sedan efter kortvarig pumpning mäta variationer i inströmningen till hålet och på så sätt detektera permeabla zoner. Figur 6.75 illustrerar tillvägåsättet.

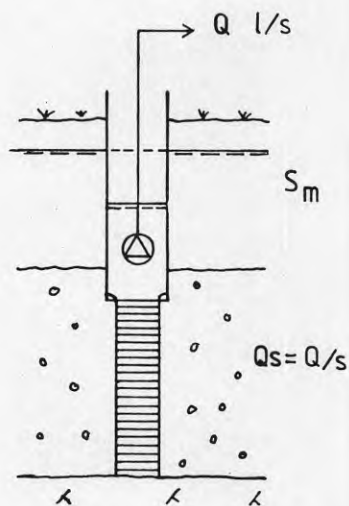


Figur 6.75 Principen för lokalisering av permeabla zoner med saltförsök.

6.5.7 Produktions- och kapacitetstester

Efter borrning av nytt hål eller i äldre hål kan rent hydrauliska flödestester utföras med relativt enkla tekniska medel.

Normalt ingår en eller flera pumpningar (kapacitetstester) i ett borrhingsåtagande. Härvid mäts flödet per tidsenhet (Q) samtidigt som avsänkningen (s) i hålet registreras. Ur värdena kan den specifika kapaciteten Q_s framräknas, se figur 6.76. Sådana tester ger information om hela det infodrade borrhålets sammantagna kapacitet. Observera att testet inte säger något om själva magasinets hydrauliska egenskaper, inte heller vilka inströmningsförluster till brunnen som råder.



Figur 6.76 Enkel kapacitetstest. Specifika kapaciteten = Q/s $l/s \cdot m$.

Ett sätt att få kapacitetsuppgiften om en viss bestämd nivå i hålet är att med hjälp av manschetter avgränsa det intervall som skall undersökas. Manschetter (-erna) expanderas mot borrhålsväggen, vanligen med tryckluft i en gummikrans, figur 6.77. Vatten injiceras under bestämt tryck ut i formationen varvid

flödesmängden mäts. Erhållna värden kan sedan användas för att beräkna permeabiliteten enligt

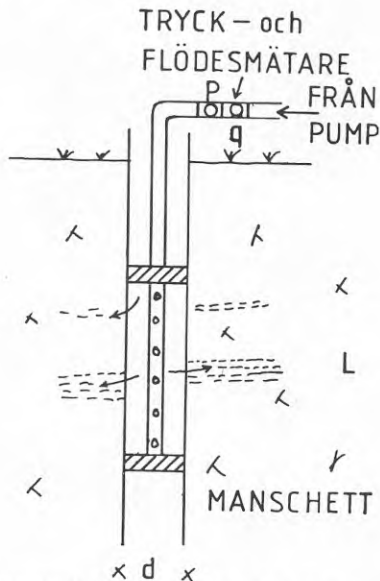
$$K = C \frac{q}{L \cdot P \cdot t}$$

där	K = permeabilitetskonstant	m/s
	C = konstant	sortlös
	q = vattenförlust	m ³
	L = mätnivåns längd	m
	t = mättiden	s
	P = injektionstrycket	m vp

Konstanten C är bestämd (Moye 1967) till

$$C = \frac{1 + \ln(L/d)}{2 \cdot \pi}$$

där d = mätvåningens diameter



Figur 6.77 Permeabilitetsbestämning genom vattenförlustmätning i begränsat intervall.

Vid injektionstester skall märkas att för låga permeabilitetsvärden lätt kan fås till följd av igensättningar i por- och spricksystem (positiv skin, se avsnitt 4.3.1). Kvarvarande bormudd liksom suspenderat material i infiltrationsvattnet måste därför uppmärksammas. Kapacitetstester i övrigt behandlas mer ingående i kapitel 10.

Akviferens transmissivitet är den parameter, som har störst betydelse för avsänkning och kapacitet i en brunn. Följande kapitel behandlar därför olika metoder att beräkna eller uppskatta transmissiviteten i ett framtida brunnsläge. Som inledning ges en översikt av siktanalyser och provtagning och provtagningsfel. Med utgångspunkt från detta visas hur permeabiliteten kan beräknas med olika metoder. Som avslutning visas hur ofullständiga pumpningsdata kan utnyttjas för en transmissivitetsbestämning.

7.1 Allmänt

Transmissiviteten kan definieras som lagerföljdens totala genomsläpplighet:

$$T = \int_0^b K(z) dz \quad (4.2)$$

Vi finner vidare i kapitel 4 att transmissiviteten har avgörande betydelse för hur stor avsänkningen blir i en uttagsbrunn. Thiems brunnsekvation ger:

$$s = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{R_0}{r} \quad (4.4c)$$

Dessa två ekvationer visar två principiellt olika vägar att bestämma akviferens transmissivitet. Antingen genom att bestämma de ingående skiktens permeabilitet och summera eller att genom en provpumpning av något slag bestämma förhållandet mellan uttag och avsänkning och på så vis bestämma T . Det senare kan tyckas möjligt endast för en färdig brunn och ha begränsad betydelse vid brunnsdimensionering, trots det finns ofta data, som gör en hydraulisk utvärdering möjlig. För brunnar i lösa avlagringar är emellertid en permeabilitetsberäkning för olika skikt från sikt-kurvor den metod som mest kommer till användning, då kontinuer-

liga jordprov är en förutsättning för att utforma filter och filterrör.

7.2 Siktkurvor

Den mest direkta metoden att bestämma kornstorleken hos ett jordprov är genom siktning. Ett torkat representativt prov av jordarten lägges på den grövsta av en serie siktar med olika maskvidd och genom att hela siktsatsen skakas faller kornen ned till den sikt som har så små maskor att kornet inte kan passera. Genom att väga vad som fastnat på varje sikt kan man bestämma hur stor andel av hela provet som har en kornstorlek (fraktion), som ligger mellan maskvidderna på två närliggande siktar.

Tabell 7.1 Kornstorleksfördelning bestämd genom siktning.

Siktvidd D(mm)	Fraktion (mm)	Vikt (g)	Frekvens	Kumulativ procent (%) (Mindre än D)
16	>16	0	0.0	100.0
8	8-16	6	1.4	98.6
4	4-8	10	2.3	96.3
2	2-4	25	5.8	90.5
1	1-2	165	38.1	52.4
0.5	0.5-1	174	40.2	12.2
0.25	0.25-0.5	37	8.5	3.7
0.125	0.125-0.25	10	2.3	1.4
0.074	0.074-0.125	3	0.7	0.7
Rest	<0.074	3	0.7	0.0

Tabell 7.1 visar resultatet av en siktning i en standardsiktserie. Som vanligt är ett resultat redovisat i tabellform inte särskilt överskådligt, en grafisk redovisning är vida överlägsen (en bild säger mer än ord). Ett stapeldiagram

(histogram) av de olika fraktionerna för samma kornstorleksfördelning visas i figur 7.1.

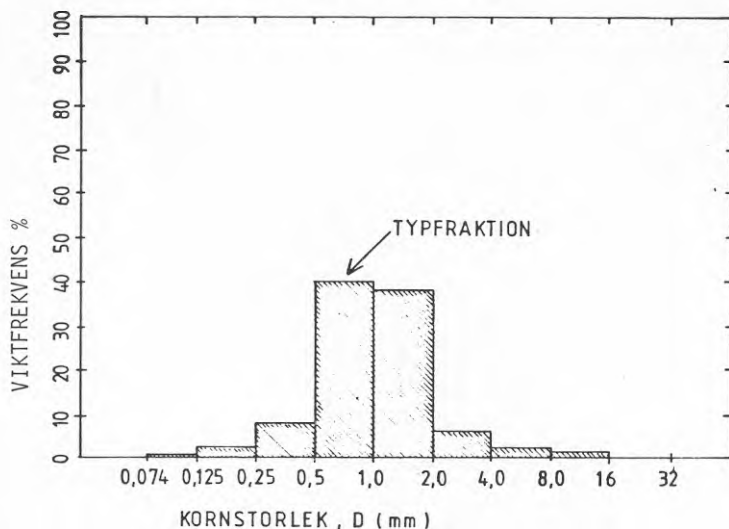
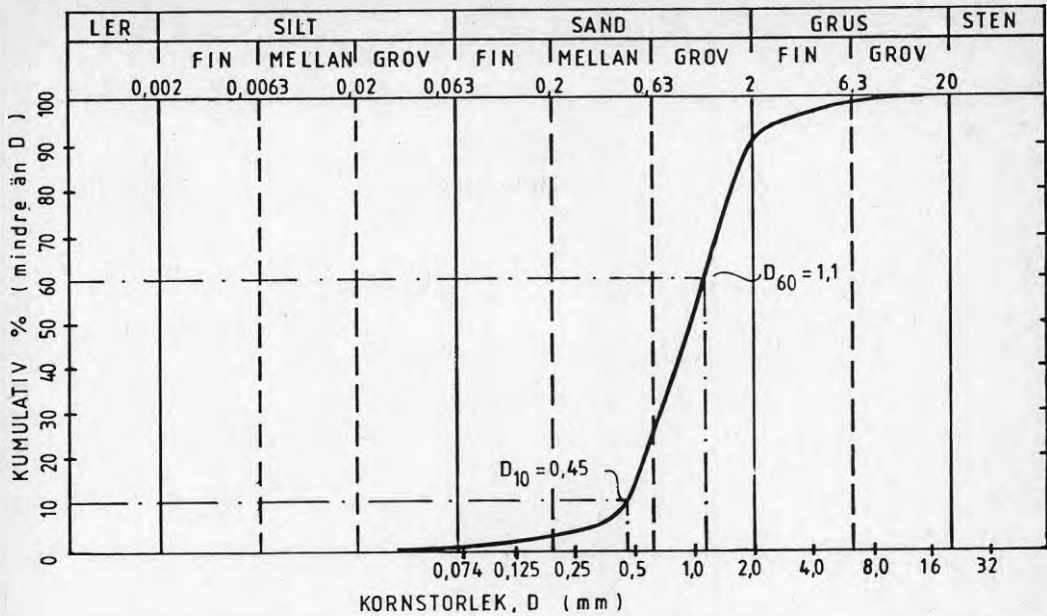


Fig 7.1 Histogram av siktanalys.

Ett histogram över kornstorleksfördelningen ger en ganska god bild av hur den är uppbyggd. Den största fraktionen, typfraktionen, kan utläsas direkt och man kan se om fördelningen är sned eller har två toppar, som kan tyda på en blandning av två olika material t ex i en skiktad jordart. Av diagrammets skala framgår att siktarnas masköppningar bildar en geometrisk serie med basen 1,0 mm och kvoten 2 med undantag för den finaste $D = 0,074$ mm. Orsaken till att man inte väljer jämna intervall efter en aritmetisk serie är helt enkelt det stora spann som råder mellan 0,074 mm och 16 mm, mer än tre tiopotenser, samt att kornstorleken oftast följer logaritmiska fördelningar, som lämpar sig utmärkt att redovisa med en klassindelning baserad på en geometrisk serie.

Om siktanalysen redovisas i en kumulativ kurva får vi vad vi i dagligt tal kallar en siktkurva, se figur 7.2.



Figur 7.2 Siktcurva över siktanalys.

Från siktcurvan har vi möjlighet att enkelt bestämma olika parametrar som karakteriserar jordarten. Medianen, betecknat D_{50} , är den kornstorlek som är vald så att 50% av provet har större korn och 50% mindre, i detta fall $D_{50} = 0,95$ mm. På samma sätt kan kornstorlekar anges som delar provet efter ett visst procenttal, percentil D_n . Två percentiler, som länge använts som statistiska parametrar för en kornstorleksfördelning är D_{60} och D_{10} . På grundval av sitt arbete om permeabiliteten hos filtersand föreslog Hazen (1892) att D_{10} skulle kallas effektiv kornstorlek. För siktcurvan i figur 7.2 gäller $D_{10} = 0,45$ mm och $D_{60} = 1,1$ mm.

För att karakterisera kornfördelningen behövs också något mått på spridningen dvs hur väl sorterat materialet är. Om material från endast en fraktion ingår är jorden väl sorterad och siktcurvan brant, och ju fler fraktioner som ingår desto flackare blir kurvan. Ett mått på kurvans lutning ger således en uppfattning om sorteringsgraden. Genom att kornskalan är uppbyggd som en geometrisk serie kan man använda kvoten mellan två valda percen-

tiler, oftast $U = D_{60}/D_{10}$ benämnt olikformighetstalet. För sikt-
kurvan i figur 7.2: $U = 1,1/0,45 = 2,4$.

I den övre skalan i figur 7.2 redovisas en annan fraktionsindelning än i figur 7.1. Denna indelning är den som i gängse tekniskt språkbruk användes för att namnge jordarterna. Fraktionsnamnen har mycket gamla anor och jordarten namnges, om det är fråga om sediment, efter typfraktionen, i detta fall grovsand. Om övriga fraktioner har betydande storlek lägges dessa till som ett adjektiv före typfraktionen, t ex grusig sand.

I siktdiagrammet finns angivna finkornigare fraktioner än den finaste sikten i en siktsats, 0,074 mm, som motsvarar de finaste korn, som går att skilja åt med torrsiktning. För silt och lera måste andra metoder användas, t ex pipett- och hydrometeranalys. Inom brunnstekniken har detta inte så stor betydelse då dessa jordar har mycket låg permeabilitet. I det fall en jord med hög finjordshalt skall tas med i en analysserie är det oftast tillfyllest att göra en våtsiktning av material mindre än 0,074 mm innan torrsiktningen utföres. Med denna metod får man en noggrann siktcurva för grovfraktionerna.

7.3 Provtagning och provtagningsfel

I kapitel 6 redovisas hur borrning och provtagning går till vid olika förfaranden. Innan vi går vidare med olika metoder att beräkna permeabiliteten är det nödvändigt att veta något om provernas kvalitet och de systematiska provtagningsfelen.

Perers (1973) har gjort en studie av olika provtagningsmetoder i en glaciälvial avlagring i Skåne. Som referensmaterial användes en ostörd slangkärna med 28 m längd. Denna provtagningsmetod är av kostnadsskäl inte möjlig att använda vid rutinmässiga undersökningsborrningar. Som jämförelse utfördes provtagningar med olika provtagningspetsar och luftspolning, perforerade rörspet-

sar och spolprov från rotationsborrning. Några exempel visas nedan.

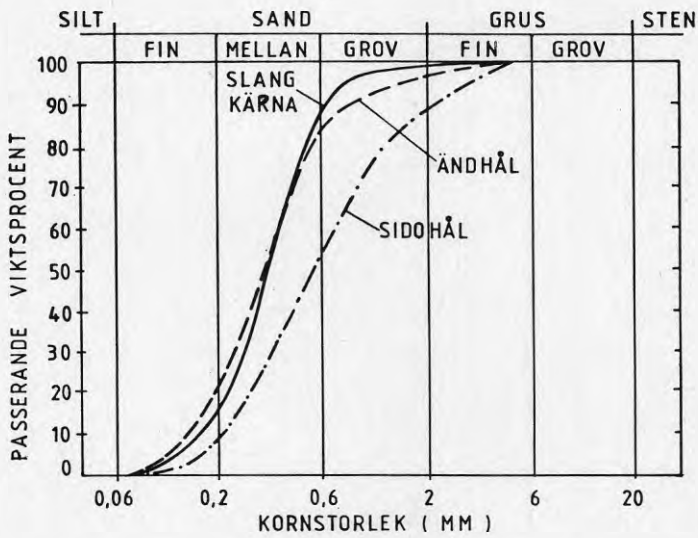


Fig 7.3 Olika provtagningsmetoder 2 - 5 m.

Figur 7.3 visar provtagning i ett sandigt material med olika provtagningspetsar. Som framgår av figuren har de med ändhål störst noggrannhet medan sidhål ger en överrepresentation av grovt material. Spolning har skett med luft.

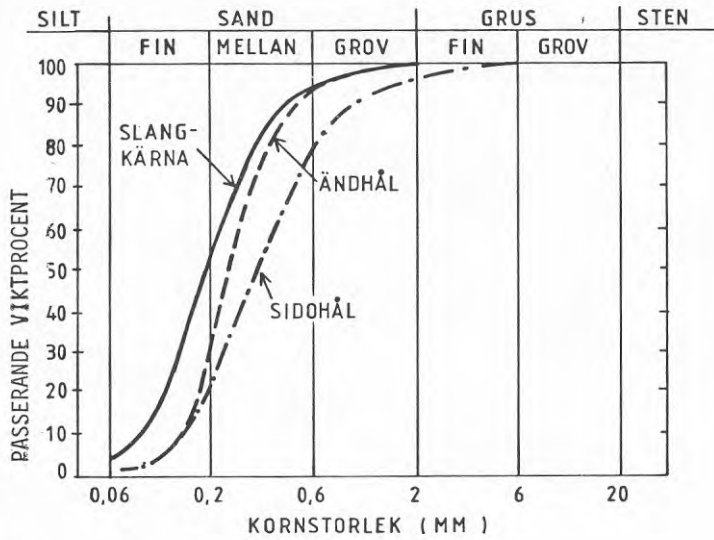


Fig 7.4 Olika provtagningsmetoder, 6 - 8 m.

Nästa provserie visar ett liknande material men med ett silt-skikt omkring 6,5 m. För det grövre materialet gäller samma slutsatser som i det förra provet, men silten saknas helt i proven från rörborringarna. Orsaken är sannolikt att finmaterialet följt med det uppblåsta vattnet vid dekanteringen innan provet förpackats.

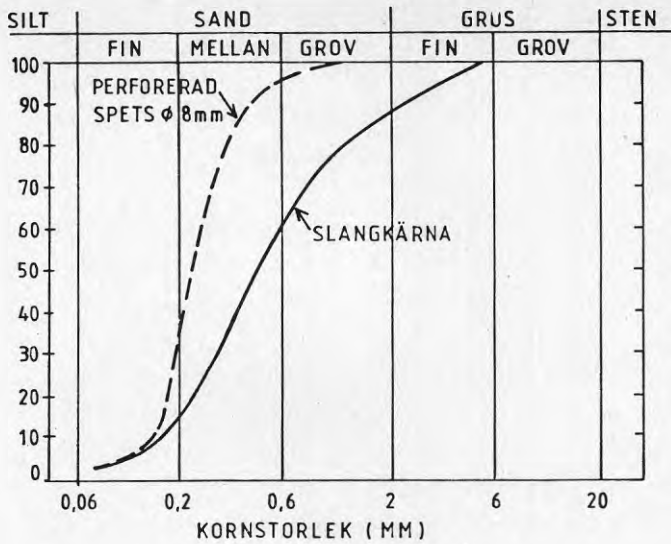


Fig 7.5 Olika provtagningsmetoder, 21 - 24 m.

Figur 7.5 visar en jämförelse mellan slangkärnan och en perforerad spets, ϕ 8 mm. Siktkurvorna visar en underrepresentation av grovkornigt material som helt enkelt beror på att perforeringarna är för små att släppa in det största kornen. I den finkorniga delen stämmer kurvorna väl. Spolning har skett med luft.

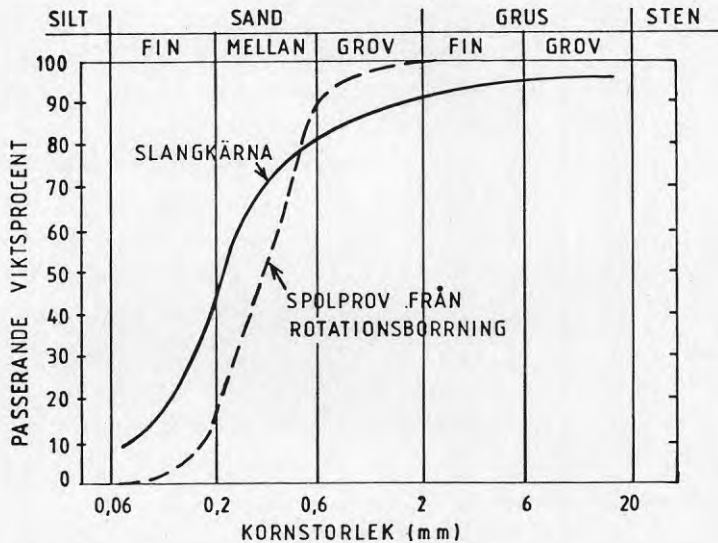


Fig 7.6 Olika provtagningsmetoder, 19 - 21 m.

Den sista kurvan visar en jämförelse mellan rotationsprov och slangkärna. I detta prov är förlusten av finmaterial än mer accentuerad.

De sammanfattande rekommendationerna från dessa provserier är att provtagning i jordlager bör ske med rörborring med provtagningsspets. Hålen i spetsen bör vara riktade nedåt och inte vara större än att passerande material kan transporteras upp mellan spolslang och rörvägg (ca 20 mm). Spolning bör ske med luft. För övriga provtagningssätt bör man vara medveten om risken för finmaterialförlust vid vattenspolning och risken för krossning av material vid andra bormetoder.

7.4 Permeabilitetsformler

Många försök har gjorts att från siktkurvor beräkna jordartens permeabilitet. En dimensionsanalys av permeabilitetskonstanten anger också att detta borde vara möjligt:

$$K = C D^2 \cdot \frac{\gamma}{\mu} \quad (4.1)$$

Den specifika permeabiliteten CD^2 är sammansatt av en formfaktor C och en karakteristisk längd D , t ex kornstorlek e_d , som man i de enklaste fallen direkt kan få ur en siktkurva. Formfaktorn C beror bland annat av packningsgrad, porositet, kornform m m enligt ofta ganska komplicerade samband och man har använt olika ansatser för att bestämma C empiriskt. Problemet med formfaktorn har också gjort att noggrannheten hos olika permeabilitetsformler varit dålig.

Den första fungerande och fortfarande allmänt använda permeabilitetsformeln ställdes upp av Hazen (1892) efter försök på filter-sand och bygger på ovanstående resonemang:

$$K = 0.01157 D_{10}^2 \text{ (m/s)}$$

$$D_{60}/D_{10} \leq 5, \text{ temp } 10^{\circ}\text{C}, D_{10} \text{ (mm)} \quad (7.1)$$

Formeln gäller således i väl sorterade jordar vid en temperatur av 10°C och tar ej hänsyn till packning, provtagningsfel o d. För sanden som representeras av vår siktkurva (fig 8.2) kan permeabiliteten beräknas till:

$$K = 0,01157 \cdot 0,45^2 = 0,0023 \text{ (m/s)}. D_{60}/D_{10} = 2,4$$

vilket ligger väl inom formelns giltighetsområde.

Om man har tillgång till ett stort material av jordprov som analyserats för brunnsdimensionering och där sedan brunnar byggts och provpumpats kan man ställa upp en permeabilitetsformel med något bättre noggrannhet.

Med utgångspunkt från sådana data har Gustafson (1982) visat att den sannolika permeabiliteten, K_{50} , för en jord representerad av en siktkurva kan beräknas som:

$$K = E(U) \cdot D_{10}^2 \quad (7.2a)$$

$$U = D_{60}/D_{10} \quad (7.2b)$$

Där funktionen $E(U)$ uttryckes genom följande samband:

$$E(U) = 10.2 \cdot 10^6 \cdot \frac{e^3}{1+e} \cdot \frac{1}{g^2(U)} \quad (7.3a)$$

$$e = 0.8 \left(\frac{1}{2 \ln U} - \frac{1}{U^2 - 1} \right) \quad (7.3b)$$

$$(\text{/. } 3b)$$

$$g(U) = \frac{1.30}{\log(U)} \cdot \frac{U^2 - 1}{U^{1.8}} \quad (7.3c)$$

I figur 7.7 redovisas funktionen E(U) i diagramform.

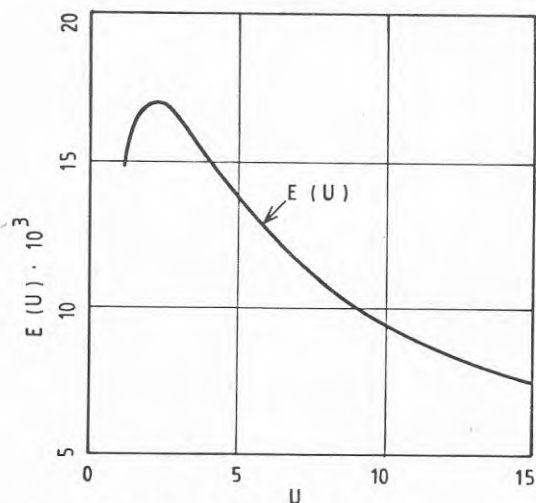


Fig 7.7 Funktionen E(U).

För att kontrollera precisionen hos en formel av ovanstående typ måste en statistisk analys av grunddata utföras. I figur 7.8 redovisas en plottning av beräknade specifika transmissiviteter ställda mot de vid provpumpningarna uppmätta.

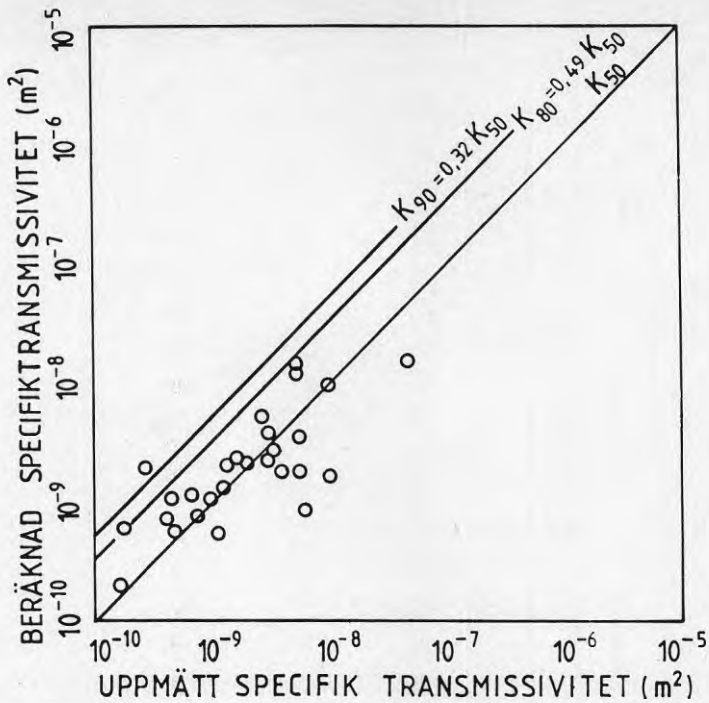


Fig 7.8 Konfidensintervall för beräknade transmissiviter.

Vi finner här att de beräknade transmissiviteterna fördelar sig jämnt kring linjen $T_s = T_p$. Vi finner vidare att 80% av de beräknade värdena är större än $0,49 \cdot K_{50} = K_{80}$ och 90% sannolikhet för att när det överskrides ger $K_{90} = 0,32 \cdot K_{50}$.

Tillämpat på det jordprov som redovisas i figur 7.2 erhålles:

$$D_{10} = 0,45 \cdot 10^{-3} \text{ m}, \quad D_{60} = 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ m}, \quad U = 1,1 / 0,45 = 2,4$$

$$e = 0,8 \left(\frac{1}{2,1 \ln 2,4} - \frac{1}{2,4^2 - 1} \right) = 0,2888$$

$$g(U) = \frac{1,30}{\log 2,4} \cdot \frac{2,4^2 - 1}{2,4^{1,8}} = 3,366$$

$$E(U) = 1,35 \cdot \frac{1000 \cdot 9,81}{1,3 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{0,2888^3}{1+0,2888} \cdot \frac{1}{3,366^2} = 16805$$

$$K_{50} = 16805 \cdot (0,45 \cdot 10^{-3})^2 = 3,11 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$$

$$K_{80} = 0,49 \cdot 3,11 \cdot 10^{-3} = 1,52 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$$

$$K_{90} = 0,32 \cdot 3,11 \cdot 10^{-3} = 9,95 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$$

En jämförelse med Hazens formel visar att för $U < 5$ gäller $E(U) = 15 \cdot 10^3$ vilket skall jämföras med konstanten i Hazens formel $C = 11,6 \cdot 10^3$. Det sannolika värdet beräknat med denna metod är således högre än vad Hazens formel anger.

7.5 Transmissivitetssummering

Sedan permeabiliteten för de olika delskikten bestämts kan transmissiviteten approximeras med en enkel summering:

$$T_s = \sum_{i=1}^n K_i b_i \quad (7.4)$$

Man måste emellertid vara medveten om de fel, som permeabilitetsbestämningarna kan ha. Det är därför lämpligt att använda en permeabilitetsformel som är anpassad till provtagningsmetoden och där man känner felens storlek. I annat fall måste den transmissivitet som används vid dimensioneringen vara reducerad med en ganska stor säkerhetsfaktor.

7.6 Transmissivitetssuppskattning från ofullständiga pumpningsdata

I många fall kompletteras vattentäkter med ytterligare brunnar. Även om driftsdata eller data från tidigare pumpningar är ofullständiga finns som regel något att gå ut ifrån. Ofta kan man finna data på nivåer i gamla brunnar under drift och vid stillestånd, som gör det möjligt att beräkna den specifika kapaciteten, Q/s_w . Om Thiems brunnsekvation (ekv 4.22) skrivs om finner man:

$$T = \frac{1}{2\pi} \left(\ln \frac{R_o}{r_w} + \xi \right) \cdot \frac{Q}{s_w} \quad (7.5a)$$

Vid stationära förhållanden kan således transmissiviteten bestämmas om influensradien och skinfaktorn är kända. Om skinfaktorn vet man att den för en brunn i ett porsystem är större än noll. $\ln R_o/r_w$ växer snabbt till ett värde omkring 7 för små influensradier för att sedan mycket sakta tillväxa, se figur 7.9.

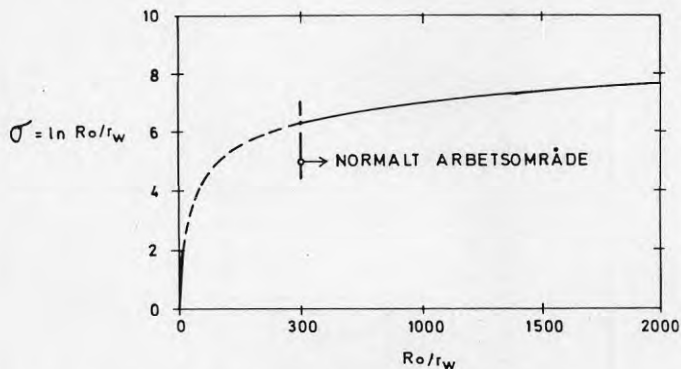


Fig 7.9 $\ln R_o/r_w$ som funktion av R_o/r_w .

Med dessa antaganden kan formeln förenklas till:

$$T \geq \frac{1}{2\pi} \cdot 7 \cdot \frac{Q}{s_w} = 1.11 \frac{Q}{s_w} \quad (7.5b)$$

Med denna formel kan således ett minsta värde för transmissiviteten för en gammal brunn erhållas. Metoden är viktig då det kan tillämpas även där normala permeabilitetsformler inte gäller, t ex i sedimentär berggrund. En varning är emellertid befogad, då avståndet till den nya brunnen inte får vara för stort, för att detta T-värde skall gälla.

Följande kapitel ger grunderna till hur en filterbrunn dimensioneras. Som inledning visas hur filter och filtterrör fungerar och vilka kriterier som styr valet av olika material och brunnsrör. Därefter ges praktiska råd och anvisningar för hur brunnar skall utformas i olika typer av formationer. Som avslutning visas med ett exempel en lämplig dimensioneringsgång.

8.1 Filtret

Filtrets uppgift är dels att hålla ute formationens finkorniga delar från brunnen, dels att tillåta vattnet passera från akviferen in i brunnen. Filtret kan byggas upp av grus eller sand som tillföres i samband med borrningen och kallas då grusfilter. Grusfiltret för okonsoliderade formationer har större kornstorlek än formationsmaterialet, se fig 8.1.

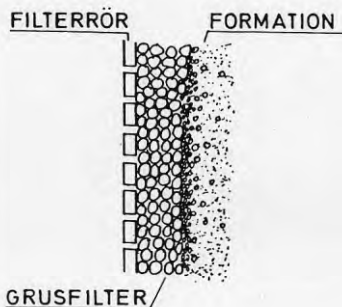


Fig 8.1 Grusfilter

Om filtret utvecklas ur formationen genom rensugning talar man om ett formationsfilter, se fig 8.2.

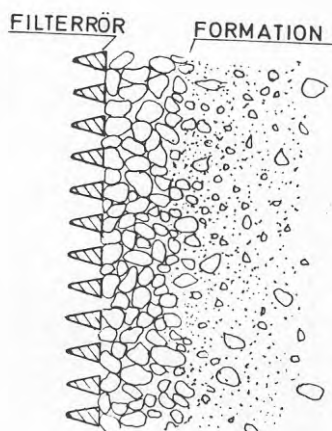


Fig 8.2 Formationsfilter.

Filtret stöder mot filtterröret som är en del av brunnsröret.

8.1.1 Filtrets verkningsätt

Om sfärer packas på tätast möjliga sätt kan man med enkel geometri bestämma den största passagen för ett korn genom porsystemet till $r = 0,155 R$. Den glesast möjliga packningen ger på motsvarande sätt $r = 0,414 R$.

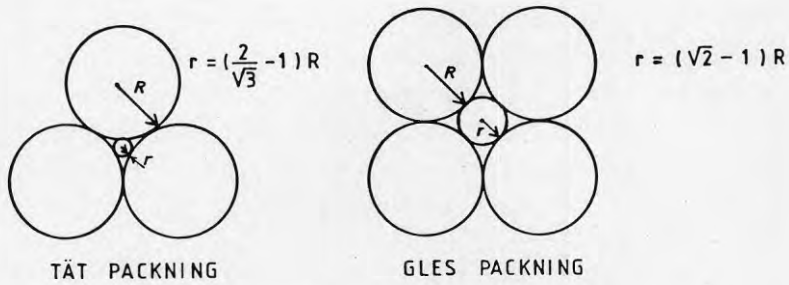


Fig 8.3 Största möjliga passage vid olika packning.

För att hindra ett korn passera filtret bör filtrets kornstorlek således väljas 2,4 - 6,5 gånger större än formationsmaterialets. Fig 8.4 visar en undersökning av filteregenskaper, som utförts inom petroleumindustrin.

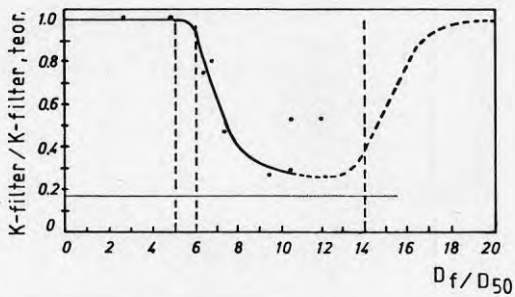


Fig 8.4 Grusfiltrets permeabilitet vid olika förhållanden mellan filtrets och formationens kornstorlek.

Figuren visar att grusfiltrets permeabilitet är konstant upp till en kornstorlekskvot $D_f/D_{50} = 5 - 6$. För högre värden reduceras filtrets permeabilitet på grund av att formationsmaterial tränger in i filtret. Kvotens värde stämmer väl överens med det teoretiskt beräknade. Permeabilitetssänkningen i grusfiltret kan radikalt sänka brunnens kapacitet och det är därför bättre att välja ett något för finkornigt filtergrus än ett med för stora korn. Speciellt viktigt är detta för filterrör med fast grusmantel eller om man av andra orsaker har svårt att rensampa brunnen. Vid mycket stora kornstorlekskvoter ökar filtrets permeabilitet igen men formationsmaterialet passerar fritt. Det senare utnyttjas i vissa fall i brunnar i sandsten där filtret skall hindra bergartsbitar att falla i brunnen men tillåta det fåtal korn som kan lossna från fragmenten att passera genom brunnen och ut. Filtret benämnes då formationsstöd.

8.1.2 Val av filtertyp

Om akviferen är uppbyggd av ett väl sorterat material, $D_{60}/D_{10} < 2,5$, bör man välja en brunn med grusfilter se fig 8.5.

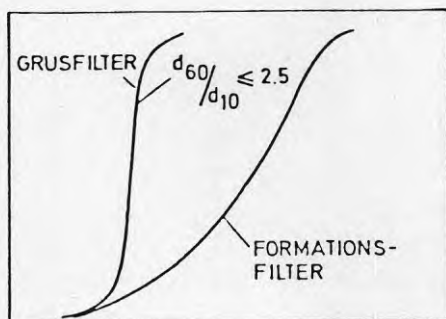


Fig 8.5 Val av filtertyp från siktkurva.

För material med sämre sortering är det möjligt och lämpligt att genom rensumpning bygga upp ett filter ur formationsmaterialet, formationsfilter. Detta fordrar emellertid filterrör med stor inströmningsarea för att göra rensumpningen möjlig.

8.1.3 Dimensionering av grusfilter

Grusfiltrets kornstorlek väljes med en kornstorlekskvot $D_f/D_{60} = 4,5 - 5,5$. Det lägre värdet väljes i mycket väl sorterade jordar medan något större kvot kan tillåtas om formationsmaterialet har sämre sortering. Filtergrus och filtersand finns att få i standard-kornstorlekar och filtrets D_{f50} väljes mindre än det lägsta D_f som beräknats för den del av lagerföljden som skall täckas.

Tabell 8.1 Kornstorlekar hos standardfiltergrus

D_f (mm)	D_{f50} (mm)
0,7-1,2	0,9
1,5-2,0	1,7
2,0-3,0	2,4
3,5-5,0	4,2
5,0-7,5	6,1

Då den största kornstorleken hos filtergruset som går att få är 5,0-7,5 mm kan i extremt grova jordar den ovan angivna kornstorlekskvoten inte hållas. Bieske anger därför en mjuk övergångskurva i siktdiagrammet (kennkornlinie), där skärningspunkten mellan denna och siktkurvan för materialet ersätter D_{60} i kornstorlekskvoten ovan.

Grusfiltrets tjocklek bör väljas mellan 70 och 100 mm. Ett alltför tunt grusfilter kan medföra att brunnen ger sand och ett för tjockt grusfilter kan medföra svårigheter vid rensumpningen.

Inflödes hastigheten får ej vara högre än att laminära förhållanden råder i filtret. Någon möjlighet att bestämma hastigheten i detalj finns inte utan bruttost hastigheten, $v_f = Q/A_f$ över filterrörets mantelyta användes. Övergången från laminärt till turbulent flöde styrs av Reynolds tal. Om beräkningen baseras på filtergrusets effektiva kornstorlek (D_{f10} , undre fraktionsgräns) gäller följande villkor:

$$R_e = \frac{\rho \cdot v_f \cdot D_{f10}}{\mu} < 10 \quad (8.1a)$$

eller för vatten vid 10°C

$$v_f \leq 0,013/D_{f10}, \quad v_f \text{ (m/s)}, \quad D_{f10} \text{ (mm)} \quad (8.1b)$$

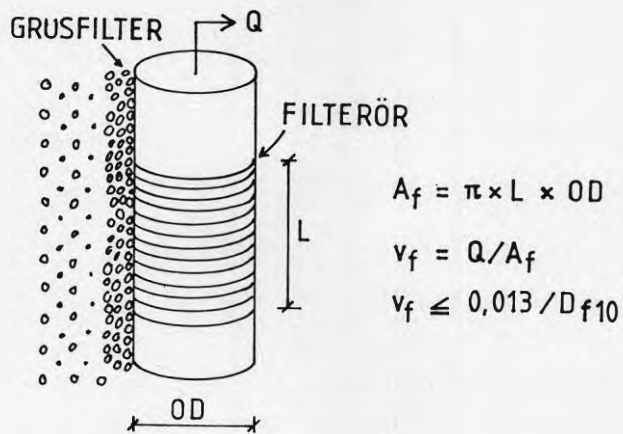


Fig 8.6 Beräkning av högsta hastighet i grusfiltret.

8.1.4 Dimensionering av formationsfilter

Formationsfiltrets kornstorlek regleras av slitsöppningarna i filterröret. Slitsarna väljes med hänsyn till formationens material, se fig 8.7

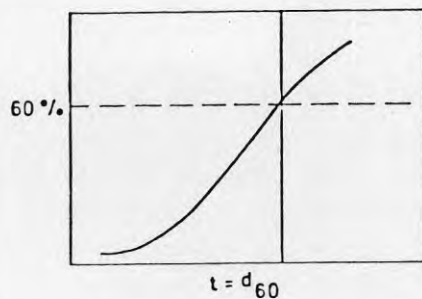


Fig 8.7 Valkriterier för slitsöppningar vid formationsfilter.

Ett osorterat material medger större slitsöppningar än ett väl sorterat. I tabell 8.2 sammanfattas valkriterierna.

Tabell 8.2 Valkriterier för slitsöppningar vid formationsfilter

Ojämnkornighetstal	Slitsöppning
$D_{60}/D_{10} \leq 2,5$	$t = D_{40}$
$2,5 \leq D_{60}/D_{10} \leq 6$	$t = D_{60}$
$6 \leq D_{60}/D_{10}$	$t = D_{70}$

Hastigheten i formationsfiltret får ej vara så hög att turbulenta förhållanden råder. Den effektiva kornstorleken i formationsfiltret motsvarar i stort sett slitsarnas öppning då de finare kornen rensumpats bort och ekvation 8.1b modifierats till:

$$v_f \leq 0,013/t \quad (8.1c)$$

Som tidigare nämnts ställs stora krav på filterröret om ett formationsfilter används. Dessa krav kan för kontinuerlig drift endast uppfyllas av filterrör med kontinuerlig slits.

8.1.5 Perforering i spetsrörbrunnar

Spetsrörbrunnar används ofta vid tillfälliga grundvattenuttag: provpumpningar, well-pointsystem o d. En spetsrörbrunn fungerar i princip på samma vis som en formationsfilterbrunn och dimensioneras därför på motsvarande sätt. Genom att spetsrörbrunnarna ofta har tillfällig karaktär och att perforeringen utgörs av runda hål där materialet stänger bättre än kring en kontinuerlig slits kan stora öppningar tolereras. Håldiametrarna väljes därför till $\emptyset = D_{90} - D_{95}$ för material med $D_{60}/D_{10} \geq 2,5$. För mer väl sorterat material bör spetsrörbrunnar användas med försiktighet, då man ofta annars får problem med sandpumpning.

8.2 Filtorröret

Filtorröret är den del av brunnsröret, som har öppningar som tillåter vattnet att passera in i brunnen. Mot filtorröret stöder filtret oavsett om det är ett grusfilter eller ett formationsfilter. Detta medför att filtorröret liksom brunnsröret i övrigt måste ha en viss hållfasthet. Många olika filterrörstyper har sett dagens ljus och vi inleder därför en kort redogörelse för olika typer av rör och hur de uppfyller de krav, som kan ställas.

8.2.1 Olika typer av filterrör

De filterrör, som finns i marknaden, är av två huvudtyper. Antingen består de av ett rör av metall, plast eller trä, som perforerats eller sågats upp för att ge slitsar eller också byggs röret upp av en kontinuerlig metallprofil som svetsats till ståndare och på så vis ger en kontinuerlig slits.

Rören av den första typen brukar underindelas efter hur slit-sarna utformas. Några exempel visas i fig 8.8.



Fig 8.8 Olika typer av slitsperforering.

Filtorrör med kontinuerlig slits byggs upp av en metallprofil, som lindats kring ståndare eller en perforerad rörstomme. Profilen är oftast trekantig med basen utåt. Vid lindningen svetsas profilen till ståndarna och bildar ett styvt rör.

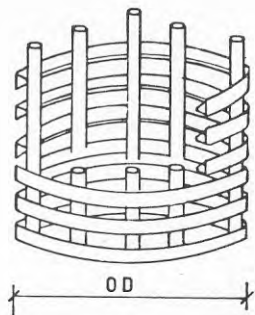
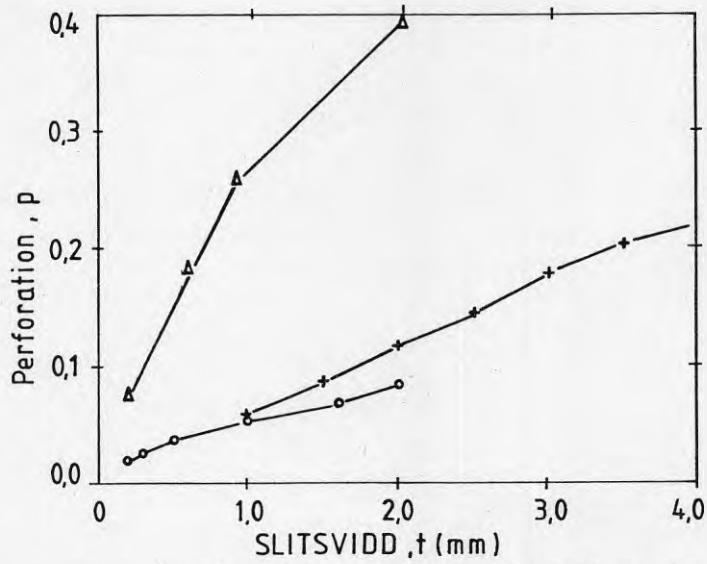
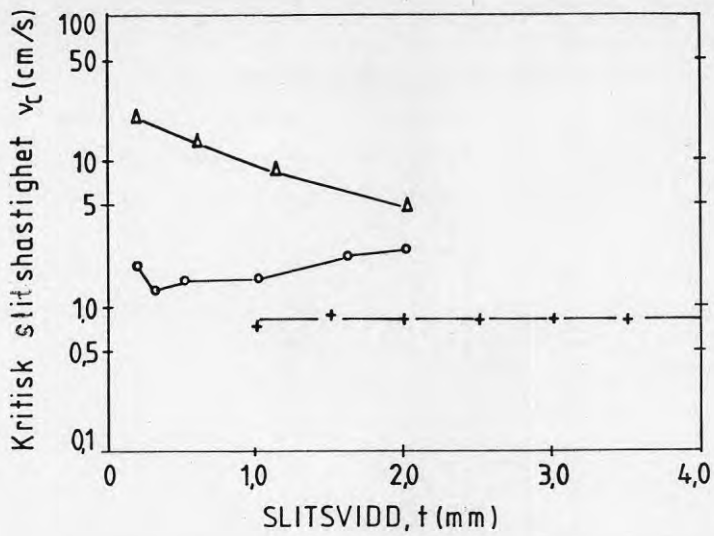


Fig 8.9 Filtorrör med kontinuerlig slits.

Filtorrörets slitsöppning, t , anger det minsta måttet i varje slits. Perforationen, f , anger kvoten mellan slitsarnas totala dagöppningar och filtorrörets mantelyta.

8.2.2 Filtorrörets hydrauliska egenskaper

Klotz (1969-75) har genomfört en stor undersökning av de hydrauliska egenskaperna hos olika filtorrörsfabrikat som förekommer i handeln. Studien har syftat till att i detalj bestämma rörens permeabilitet för att kunna förutsäga resultat av enhålsförsök med spårämnen. Försöken har också givit möjlighet att bestämma flödesförhållandena i slitsarna och vid vilken inträdeshastighet inflödet övergår till turbulenta förhållanden, se fig 8.10.



- +- Överbryggade slitsar, godstjocklek 6mm
 - Δ- Kontinuerlig slits, ϕ 50mm
 - Raka slitsar, plastfilterrör
- Data efter klotz

Fig 8.10 Kritisk slitshastighet och perforation för olika typer av filterrör.

Som framgår av det övre diagrammet har rören med kontinuerlig slits den överlägset högsta övergångshastigheten från laminära till turbulenta förhållanden. Denna typ av rör har också den största perforationen, vilket ytterligare visar rörtypens överlägsenhet. En av de ledande tillverkarna av filterrör med kontinuerlig slits, Johnson Division, UOP, rekommenderar en högsta hastighet av 3 cm/s i slitsarna vilket synes ligga betryggande under gränshastigheten. För övriga rörtyper kan knappast högre hastighet än 1 cm/s rekommenderas.

8.2.3 Filtrerrörets rensningsbarhet

Under rensningen finns inget krav på laminära flödesförhållanden, tvärtom önskar man maximal omrörning av filter och formation för att bryta ned igensättningar av borrhållsväggen och dra ut finmaterialet. Perforationen har däremot avgörande betydelse och om rensning med jetspolning utföres fordras fri passage ut mot formationen, se kapitel 9.

Slitsarnas utformning har också stor betydelse för rensningsbarheten. Det är viktigt att slitsarna vidgas inåt för att inte korn skall fastna i den och initiera ytterligare igensättningar, se fig 8.11.

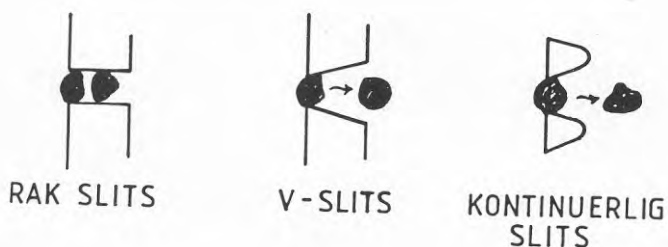


Fig 8.11 Igensättning i slitsarna

V-slits ger således möjlighet att rensumpas och ta upp material med kornstorlek upp till slitsvidden.

8.2.4 Filterrörets hållfasthet

Ett brunnsrör skall dimensioneras för att tåla dels de påkänningar som det utsätts för vid montering och rensumpning, dels de jord- och vattentryck, som verkar på det under drift. Varje filterrörstillverkare ger olika hållfasthetsparametrar för sina rör och följande kan vara värt att beakta:

- Draghållfastheten, har störst betydelse vid montering eller om filterröret skall hängas i brunnsröret. Röret skall minst tåla sin egen vikt. Framförallt vid långa brunnsrör kan draghållfastheten vara kritisk.

- Rörets kollapstryck, har störst betydelse för de täta delarna av brunnsröret, se fig 8.12

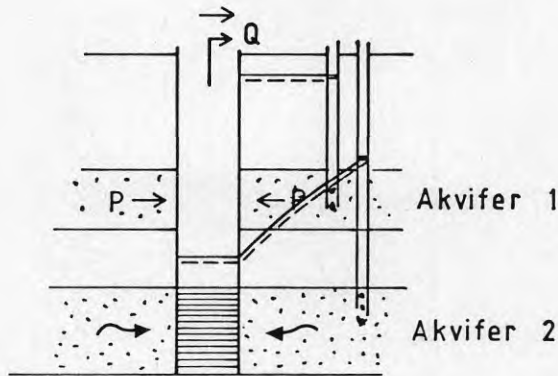


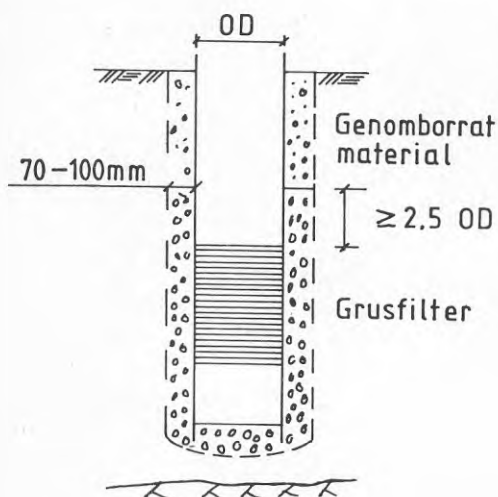
Fig 8.12 Hydrostatiskt tryck på brunnsröret.

Om brunnen penetrerar flera akviferer, och vatten endast tas från en av dem, kan tryckskillnader uppstå mellan rörets in- och utsida. Jordtrycket byggs upp till ett begränsat värde, som sedan inte växer med djupet. En god regel är att hela brunnsröret skall tåla ett tryck utifrån motsvarande det hydrostatiska vattentrycket i vila.

- Slaghållfasthet, för att tåla tryck och stötar vid montering, renspumpning och underhåll. Även pumpstarter och -stopp kan ge slag på brunnsväggen. Speciellt plastmaterial kan ha låg slaghållfasthet.

8.3 Brunnar i olika formationer

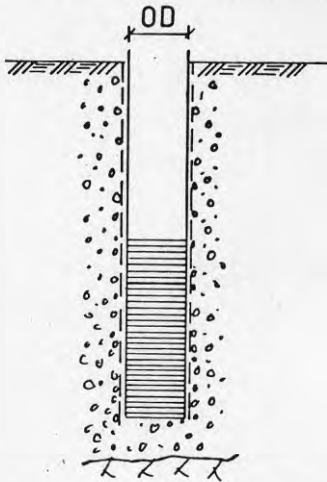
8.3.1 Grusfilterbrunn i grovsediment



Lämplig brunn i grovkornigt material. Stor borrhinsdiameter medför begränsning av djupet. Ger god plats i brunnsröret för pumpar och andra installationer. Inga speciella krav på filterröret.

Fig 8.13 Grusfilterbrunn i grovsediment.

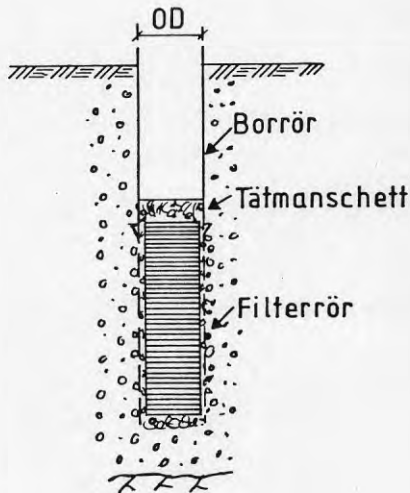
8.3.2 Formationfilterbrunn



Lämplig brunn i de flesta sammanhang. Diametern anpassas efter installationer och pumpar. Kräver ett filterrör med kontinuerlig slits. Stora krav på rensumpning.

Fig 8.14 Formationsfilterbrunn.

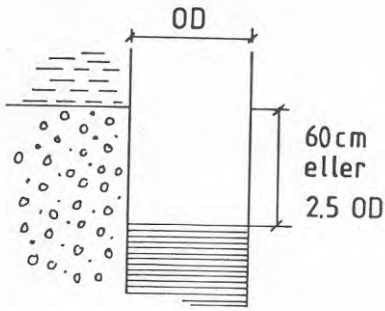
8.3.3 Formationsfilterbrunn med förlorat filter.



En variant på föregående. I vissa fall kan det vara lämpligt att lämna borrret som brunnsrör, speciellt vid små brunnsdiametrar, då detta ger bättre plats för pumpar o d.

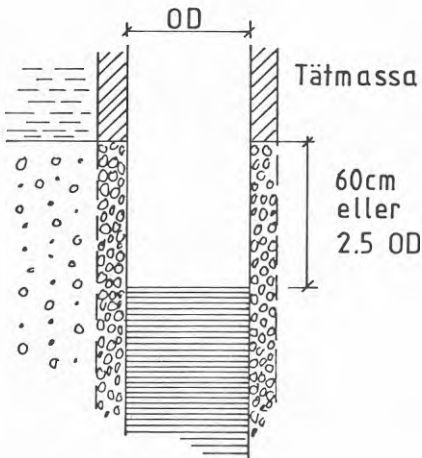
Fig 8.15 Formationsfilterbrunn med förlorat filter.

8.3.4. Olika konstruktionsdetaljer



Då akviferen överlagras av finsediment måste tillräcklig sträcka blankt rör lämnas över filterröret. Vid rens-pumpning sker alltid sättningar i filtret, som kan medföra att det finkorniga materialet rasar ned mot filterröret.

Fig 8.16 Anslutning mot finsediment.



För en grusfilterbrunn måste en tätning läggas mellan brunnsrör och finsediment. Avståndet till filterröret bör även i detta fall vara 2,5 x OD eller minst 60 cm.

Fig 8.17 Anslutning vid grusfilterbrunn.

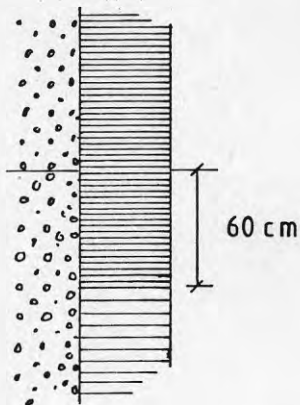


Fig 8.18 Ändring av slitsvidd.

Om ett finkornigare material överlagrar ett gröve och olika slitsvidd användes bör inte de grova slitsarna dras upp närmare än 60 cm från skiktgränsen. Slitsöppningen i det undre skiktet bör ej vara större än två gånger slitsvidden i det övre.

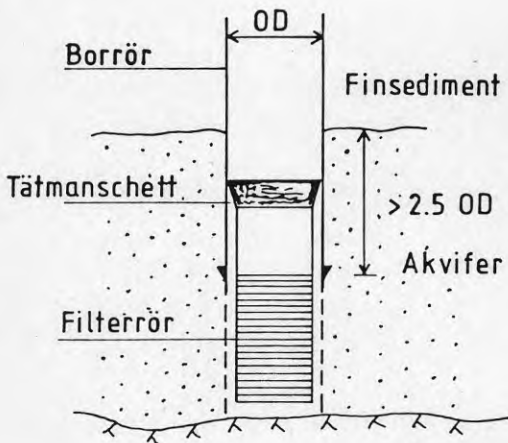
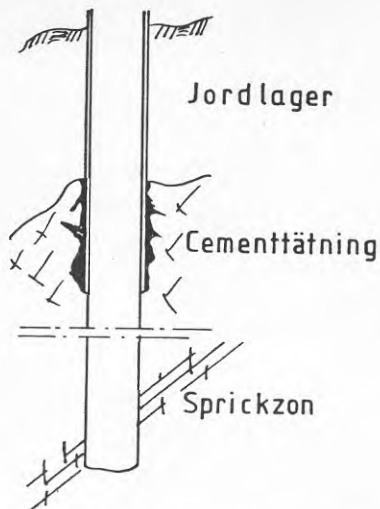


Fig 8.19 Brunn under finsediment.

En brunn i ett tunt sandlager under finsediment bör utföras med förlorat filter, för att störa lagergränsen så litet som möjligt. Renspumpning bör utföras försiktigt.

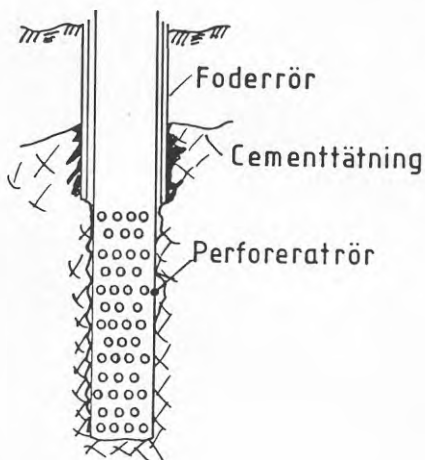
8.3.5 Brunnar i sedimentära bergarter

Brunnar i berg, är ofta inte möjliga att dimensionera. Ett undantag är sedimentära bergarter där man av erfarenheter från närliggande brunnar ofta har en god uppfattning om akviferens transmissivitet och hur en brunn skall utformas. Nedan ges tre exempel.



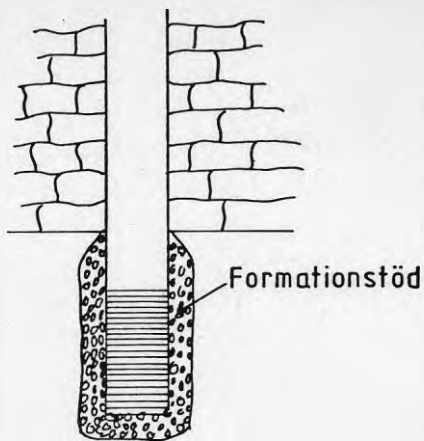
I fast berg kan borrhålet lämnas utan fodring. Detta är den vanligaste brunnen i urberg och kalksten. Tätningen mellan berg och jord är viktig och sker enklast med cementinjektering.

Fig 8.20 Brunn i konsoliderade bergarter.



I sprickigt och sprött berg, t ex kvartsitisk sandsten, lossnar ofta bergartsbitar från borrhålsväggarna. För att hindra att dessa bitar faller in och kilar fast pumpar o d kan man fodra brunnen med ett perforerat rör. Perforeringarna väljes stora, ca \emptyset 10 mm.

Fig 9.21 Brunn i sprickigt berg.



I sandsten kan det vara lämpligt att stödja formationen med ett formationsstöd. Detta bör tillåta sandstens enskilda korn att passera, $D_f > 15 D_{50}$ (se fig 8.4). I löst konsoliderad sandsten dimensioneras som för lösa jordlager.

Fig 8.22 Brunn i sandsten.

8.4 Dimensioneringsgång

Följande avsnitt redovisar en lämplig dimensioneringsgång för filterbrunnar i jordlager. För att göra det gripbart illustreras proceduren med ett exempel. Grunddata för exemplet redovisas i tabell 8.3.

8.4.1 Dimensionerande mängder och avsänkningar

Två problemställningar finns, antingen att dimensionera en brunn med önskad kapacitet, $Q_ö$ eller att dimensionera en brunn med maximal kapacitet, Q_{max} , vid en största tillåten avsänkning, s_{till}

I båda fallen är det nödvändigt att få en rimlig uppfattning om förhållandet mellan maximal avsänkning och maximalt uttag för att kunna bestämma brunnens geometri. Med utgångspunkt från Thiems brunnsekvation (4.4c) erhålles:

A) Önskad kapacitet, $Q_ö$

$$s_w = \frac{Q_ö}{2\pi T} \ln \frac{R_0}{r_w} \quad (8.2)$$

Som T-värde användes T_{80} eller om någon annat transmissivitetsuppskattning använts, ett T-värde som reducerats med en rimlig säkerhetsmarginal. För att kompensera för ökad avsänkning orsakad av att brunnen blir ofullständig o d ökas preliminära dimensionerande avsänkningen med 50 %, $s_{dim}=1,5 \cdot s_w$

Influensradien, R_0 , Väljes normalt till 1 000 m om inte andra data motiverar något annat. Brunnsradien skattas i förhållande till önskad kapacitet.

Tabell 8.3 Grunddata för dimensioneringsexempel

a) Borrprotokoll: Provtagningspets \emptyset 50 mm. Luftspolade prov.

Djup (m)	Genomborrade jordlager	Vattengenomsläpplighet
0,0- 7,0	sandigt grus	
7,0- 9,0	(grusig) sand	
9,0-10,0	sand	god
10,0-14,0	(grusig)siltig sand	god
14,0-16,0	grusig sand	mycket god
16,0-20,0	sand	- " -
20,0-21,0	siltig sand	mindre god

Marknivå +65,4 m, grundvattennivå + 57,20 m.

b) Siktanalyser

Djup (m)	D_{10} (mm)	D_{60} (mm)	b _i (m)	D_{60}/D_{10}	$(\cdot 10^{-3} K_i)$ (m/s)	$(\cdot 10^{-3} T_i)$ (m ² /s)
6- 7	0,35	4,5	1	Ovan grundvattennivån		
7- 8	0,25	0,83	1	- " -		
8- 9	0,16	0,45	1	2,8	0,42	0,42
9-10	0,12	0,22	1	1,8	0,24	0,66
10-11	0,125	0,60	1	4,8	0,22	0,88
11-13	0,70	2,5	2	3,6	7,66	16,20
13-14	0,14	1,6	1	11,4	0,17	16,37
14-15	0,30	1,1	1	3,7	1,40	17,76
15-16	0,45	1,1	1	2,4	3,40	21,17
16-17	0,32	0,98	1	3,1	1,66	22,83
17-18	0,20	0,63	1	3,2	0,65	23,48
18-19	0,17	0,45	1	2,6	0,48	23,96
19-20	0,19	0,60	1	3,2	0,58	24,54
20-21	0,08	0,37	1	4,6	0,09	24,63

$$K_{80} = K \cdot 0,49 \quad T_{80} = 0,012 \text{ m}^2/\text{s}$$

c) Vattenkvalitet

Färg	10 mg/l Pt	NH ₄	< 0,01 mg/l
Grumlighet	Ingen	NO ₂	0,02 "
Lukt	Ingen	HCO ₃	88 "
Bottensats	Ingen	Cl	28 "
pH	7,1	Ca	30 "
Ledningsförmåga	250 μ S/cm	Mg	6 "
Permanganatförbr	5 mg/l	F	0,5 "
Fe	0,14 mg/l	Mn	0,05 "

B) Största tillåten avsänkning, s_{till}

$$Q_{max} = \frac{s_{till} \cdot 2\pi T}{\ln R_o/r_w} \quad (8.3)$$

Även i detta fall användes T_{80} eller motsvarande. För att kompensera för konstruktionsdetaljer väljes Q_{dim} 30 % lägre än beräknat värde, Q_{max}

Exempel: Brunnen skall dimensioneras för en kapacitet,

$$Q_o = 25 \text{ l/s. Med transmissiviteten } T_{80} = 0,012 \text{ m}^2/\text{s} \text{ erhålles:}$$

$$s_w = \frac{0,025}{2\pi \cdot 0,012} \cdot \ln \frac{1000}{0,2} = 2,82 \text{ m}$$

För dimensioneringen ökas denna till

$$s_{dim} = 2,82 \cdot 1,5 = 4,3 \text{ m}$$

8.4.2 Brunnsdiameter och filtertyp

Brunnsdiametern väljes främst med hänsyn till de pumpar och installationer, som skall finnas i den färdiga brunnen. Kapaciteten påverkas endast obetydligt, då avsänkningen är beroende av logaritmen för brunnsradien. Om Theims brunnsekvation (4.4c) tillämpas erhålles följande samband vid en fördubbling av brunnsradien.

$$s_w = \frac{Q_o}{2\pi T} \cdot \ln \frac{R_o}{r_w} = \frac{Q_1}{2\pi T} \cdot \ln \frac{R_o}{2r_w} \quad (8.4a)$$

$$Q_1 = Q_o \frac{\ln R_o/2r_w}{\ln R_o/r_w} \quad (8.4b)$$

$$R_0 = 1000 \text{ m} \quad r_w = 0,2 \text{ m} \Rightarrow Q_1 = 1,09 Q_0 \quad (8.4c)$$

En dubbling av brunnsradien innebär således en kapacitetsökning med knappt 10% vilket i de flesta fall inte kan motivera den kostnadshöjning, som följer av dimensionsökningen.

Med hänsyn till pumpstorleken ges följande rekommendationer för brunnsrörnsdimensionen i Manual of Water Well Construction Practices, EPA-570/9-75-001.

Tabell 8.3 Brunnsrörets diameter vid olika pumpkapaciteter.

<u>Kapacitet, Q(l/s)</u>	<u>Brunnsrörets diameter, (mm)</u>
0 - 6,0	150 ID
4,5 - 10,5	200 ID
9,0 - 24,0	250 ID
21,0 - 36,0	300 ID
36,0 - 78,0	400 OD
78,0 - 108,0	500 OD
108,0 - 180,0	600 OD
180,0 - 270,0	750 OD

ID = Innerdiameter OD = Ytterdiameter

Filtertypen väljes med hänsyn till materialets sorteringsgrad. För material med ojämnskornigheter $D_{60}/D_{10} \geq 2,5$ väljes formationsfilter och för mer väl sorterat material ett grusfilter, se 8.1.2.

Exempel: Brunnens kapacitet skall vara 25 l/s. Enligt tabell 8.3 väljes brunnsrörets ytterdiameter (OD) till minst 300 mm. \emptyset 400 är en vanlig borrhingsdiameter och för att hålla kostnaderna nere väljes en filterdiameter

som passar inuti borrhörret. Närmaste dimension under borrhörret är 14 ½" med ytterdiametern 360 mm OD.

Enligt tabell 8.3 har alla jordprover utom 15 - 16 m $D_{60}/D_{10} > 2,5$. För detta prov gäller $D_{60}/D_{10} = 2,4$ men provet är jämförelsevis grovkornigt varför vi väljer ett formationsfilter.

8.4.3 Filtrerrörets längd och slitsvidd

Riktlinjerna för slitsvalet ges i avsnitt 8.14. Filtrerrörets längd måste väljas så att avsänkning ned i filtret ej sker (se kapitel 5.3.6) och att den kritiska inflödes hastigheten ej överskrides. Se 8.2.2. Detta kan medföra att filterlängden måste passräknas fram mot de begränsade faktorerna.

Exempel: Den dimensionerande avsänkningen har bestämts till $s_{dim} = 4,3$ m. Om pumpen sättes ovanför filtrerröret bör man ha ytterligare en meter tillgodo för dess intags-sil. Detta innebär att filtrerröret bör avslutas uppåt på nivån: $57,2 - 4,3 - 1 \text{ m} = +51,9 \text{ m}$ eller 13,5 m under markytan. Nedåt avslutas filtrerröret 20 m under markytan då det understa skiktet är finkornigt. Filtrerrörets längd blir då 6,5 m.

Slitsarna väljes till $t = D_{60}$ för det dimensionerande skiktet 18 - 19 m, $D_{60} = 0,45$ mm. Närmaste standard-slitsar är 0,37 mm och 0,5 mm. Omkringliggande skikt är grovkornigare, varför vi väljer $t = 0,5$ mm.

8.4.4 Kontroll av inflödes hastighet i filter och filtrerrör

Flödes hastigheten i filtret styrs av Reynolds tal, se 8.1.3, och inflödes hastigheten i slitsarna skall vara mindre än $v_c = 0,03$ m/s, se 8.2.2.

Exempel: Filtrets mantelyta är $A_f = \pi \cdot OD \cdot L = \pi \cdot 0,36 \cdot 6,5$
 $0,36 = 7,35 \text{ m}^2$. Filterhastigheten är:

$$v_f = \frac{Q_{\ddot{o}}}{A_f} = \frac{0,025}{7,35} = 0,003 \text{ m/s.}$$

Med hänsyn till Reynolds tal gäller:

$$v_f \leq 0,013/D_{fe} = 0,013/0,5 = 0,03 \text{ m/s.}$$

Detta villkor är därmed inte begränsande.

Filtorrörets perforation är $f = 0,18$ (tillverkarens katalog). Hastigheten i slitsarna kan då beräknas till $v_t = Q_{\ddot{o}} / A_f \cdot f = 0,025/7,35 \cdot 0,18 = 0,019 \text{ m/s}$. Detta är ej heller begränsande.

8.4.5 Kontroll av avsänkningen

Avsänkningen i brunnen måste nu kontrolleras för att se att inte filtret kommer att torrläggas. Beräkningen utföres med korrektion för pseudoskinfaktor. I öppna grundvattenmagasin korrigeras även för avtagande mäktighet, se kapitel 4.

$$s_w = \frac{Q}{2\pi T_o} \left(\ln \frac{R_o}{r_w} + \xi_p \right) + C^1 Q^2 \quad (8.5a)$$

$$C^1 = \frac{(\ln R_o/r_w)^2}{8h_o \pi^2 T_o^2} \quad (8.5b)$$

Pseudoskinfaktorn kan bestämmas med utgångspunkt från brunnens slankhet, $\lambda = b/r_w$, och penetration, $p = l/b$, se fig 8.23.

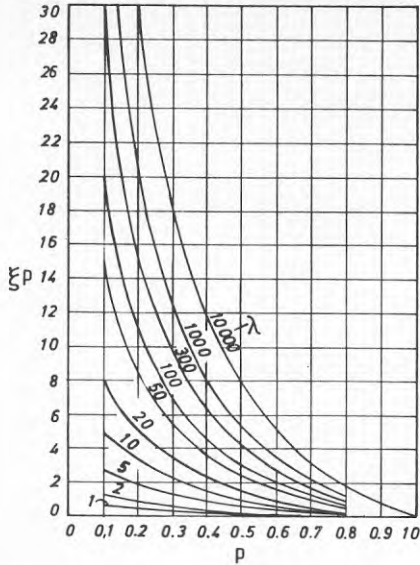


Fig 8.23 Pseudoskinfaktor. Efter Brons och Marting (1961).

I en heterogen formation väljes penetrationen som kvoten mellan transmissiviteten hos den del av formationen som täcks av filterröret, T_{sc} , och den totala transmissiviteten.

Exempel: Formationens mäktighet $b = h_0 = 21 - 8,2 = 12,8$ m.
 Brunnens slankhetstal: $\lambda = b/r_w = 12,8/0,18 = 71,1$
 $T_{sc} = (24,54 - 16,29) \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s} = 8,25 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$,
 se tabell 8.2. Penetrationen blir då $p = T_{sc}/T = 0,33$. Från figur 8.23 erhålles $\xi_p = 5,5$.

Avsänkningen beräknas med transmissiviteten

$$T_{80} = 0,012 \text{ m}^2/\text{s}.$$

$$C1 = \frac{(\ln \frac{1000}{0,18})^2}{8 \cdot 12,8 \cdot \pi^2 \cdot 0,012^2} = 511 \text{ s}^2/\text{m}^5$$

$$s_w = \frac{0,025}{2\pi \cdot 0,012} (\ln \frac{1000}{0,18} + 5,5) + 511 \cdot 0,025^2 = 5,0 \text{ m}$$

Denna avsänkning är större än det tidigare tillåtna $s_{\max} = 4,3$ m. Orsaken ligger i den stora pseudoskinfaktorn som beror på att det grovkorniga skiktet mellan 11 och 13 m inte utnyttjas. Om filtret lyftes 1 m och brunnen utrustas med sumprör för pumpen mellan 19 och 21 m förändras pseudoskinfaktorn till följande,

$$T_{sc} = (23,96 - 12,37) \cdot 10^{-3} = 11,59 \cdot 10^3 \text{ m}^2/\text{s. } p =$$

$$T_{sc}/T = 0,47. \quad \xi_p = 3,0/s_w = \frac{0,025}{2\pi \cdot 0,012} (\ln \frac{1000}{0,18} + 3,0) +$$

$$+ 511 \cdot 0,025^2 = 4,2 \text{ m.}$$

Avsänkningsvillkoret är därmed uppfyllt.

8.4.6 Materialval och hållfasthet

Materialet väljes med hänsyn till korrosion enligt kapitel 5 och filtterrörets hållfasthet kontrolleras mot tillverkarens katalog.

Enligt tillverkarens katalog är tryckhållfastheten för filtterröret \emptyset 360 mm 160 kPa med säkerhetsfaktorn 2. Vattentrycket vid brunnsrörets underkant är ca 130 kPa.

Filtterrörets axialhållfasthet är enligt tillverkaren 1,15 MN vilket vida överskrider rörets vikt. Rörets hållfasthet är därför tillräcklig.

8.4.7 Borrningsföreskrifter och brunnsritning

Dimensioneringen avslutas med att man färdigställer en detaljerad byggnadsbeskrivning. Detta kommer att behandlas utförligt i kapitel 9. Beskrivningen beledsagas av en brunnsritning, där brunnens slutliga utseende redovisas.

Exempel: En brunnsritning för vårt valda exempel redovisas i fig 8.24.

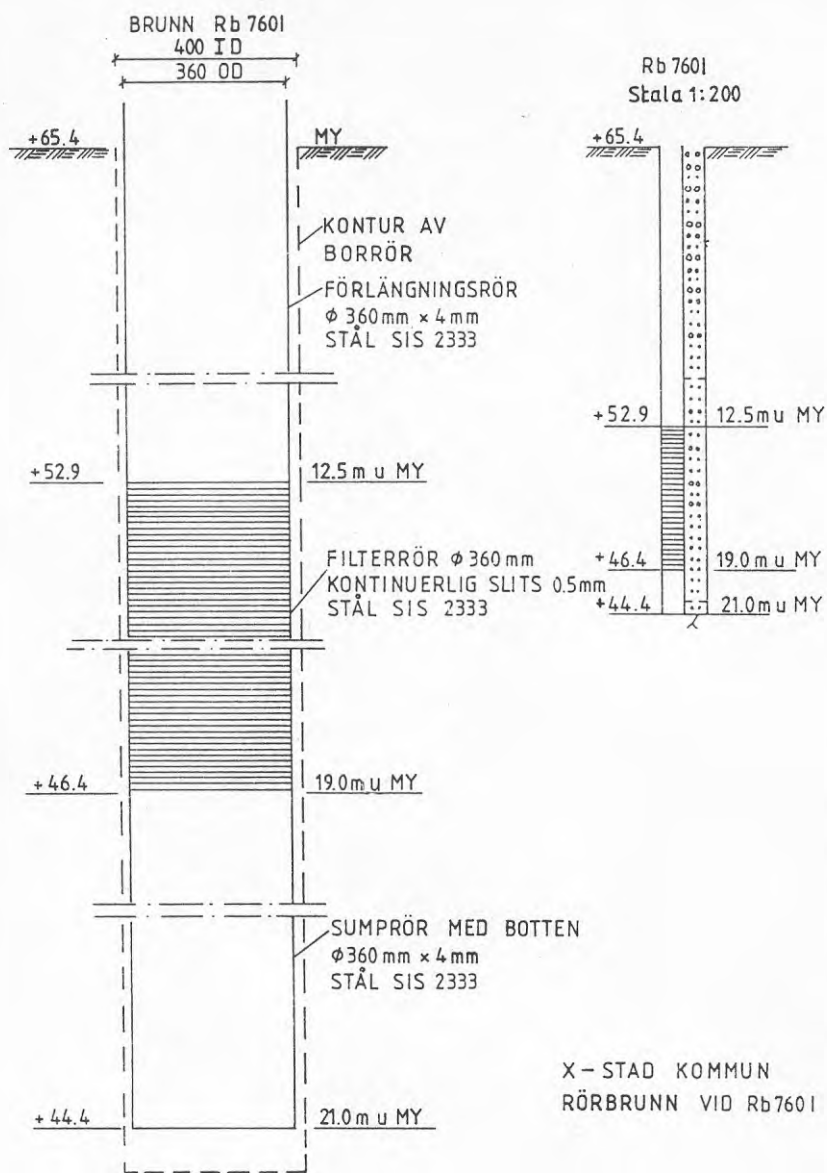


Fig 8.24 Brunnsritning.

Det praktiska utförandet och byggandet av brunnar består av en rad olika moment. Borrningsmetod skall väljas, vilket har behandlats under kapitel 6. Utgående från borrningsmetod och filtertyp sätts filterrören och filtret på plats. Härfter följer flera moment för att färdigställa brunnen så att den ger maximal kapacitet, har liten risk för igensättning, korrosion, igensandning och ett bakteriefritt vatten. Slutligen skall brunnen testas för sitt arbetsområde.

Brunnsbyggandet skall alltid följas av en dokumentation av utförda arbeten och brunnsens utformning för att underlätta underhåll och reparation i framtiden.

9.1 Borrning

I bästa fall har en borrning som syftar till att färdigställa en brunn föregåtts av en förundersökning som givit besked om lämpligt brunnsläge och utformning av brunnen. Om så är fallet vet man också vilka jord- och berglager som skall genomborras och kan på grundval härav välja rätt borrar metod. Om så inte är fallet, vilket är alltför vanligt, kan man genom att använda geologiska kartor, uppgifter från äldre borrarningar i närheten etc bilda sig en någorlunda uppfattning om de hydrogeologiska förhållandena.

Oavsett omfattning av förundersökningar är det väsentligt att kunna välja rätt borrar metod och rätt utrustning för varje enskilt fall - stora ekonomiska värden står på spel.

I Sverige finns ett antal metoder tillgängliga. Dessa har beskrivits i kapitel 6 bl a med syfte att ge en samlad bild av vad som finns att tillgå på marknaden, men också för att visa de olika metodernas lämplighet vid varje borrarstillfälle. Tabell 9.1 ger en översikt av metoderna och deras användbarhet i olika geologiska miljöer.

Tabell 9.1 Översiktlig användbarhet (borrningsteknisk) av olika brunnborrningsmetoder.

De vanligaste konventionella metoderna brunnborrning	Användbarhet					
	Jordlager			Berglager		
	Lera/ Silt	Sand/ Grus	Sten- jord	Lösa form	Hårda form	Sprickiga form
Linstötborrning						
med rör	x	x	x	(x)		(x)
utan rör				x	x	x
Rotationsborrning						
med direktspolning						
vatten/mudd	x	x	(x)	x	(x)	x
luft/skum	x	x	(x)			(x)
med omvänd spolning						
vatten/mudd	x	x	(x)	x	(x)	x
Slående roterande borrn hammarborrning						
topphammare				x	x	x
sänkhammare				x	x	x
od/odex-borrning						
topphammare	(x)	x	x	(x)		
sänkhammare	(x)	x	x	(x)		
Enkel rördrivning	x	x	(x)			

9.2 Sättning av filter och filterrör

9.2.1 Allmänt

Filter och filterrör används för rörbrunnar i jordlager samt för brunnar i uppsprucket berg.

9.2.2 Filterrör

Efter vilken princip som filtret och filterröret placeras på plats beror i huvudsak på två faktorer, nämligen

- Borringsmetod, dvs om foderrör används eller inte
- Filtertyp, dvs grusfilter eller formationsfilter

Om foderrör används kan följande metoder för placering av filterröret tillämpas:

- 1 Foderröret borrar till borrhålets totala längd varefter filterröret med eller utan förlängningsrör placeras genom foderröret. Foderröret dras sedan upp till filterrörets överkant eller längre, Fig 9.1 och Fig 9.2.

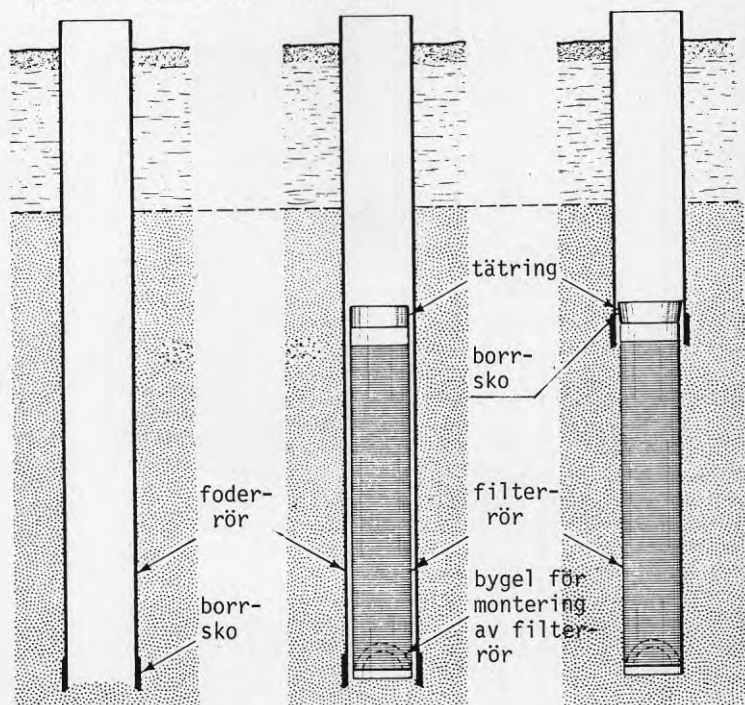


Fig 9.1 Foderrörborring av formationsfilterbrunn där foderröret dras upp och bildar förlängningsrör.

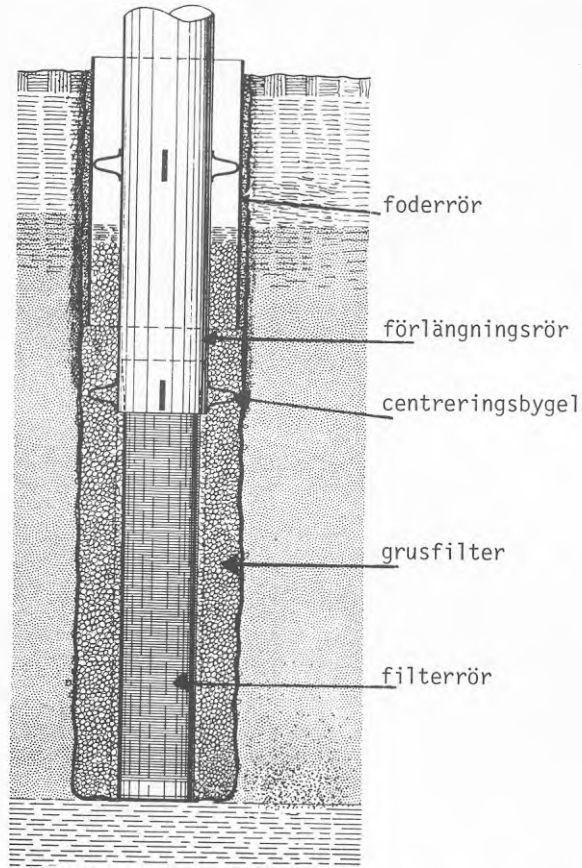


Fig 9.2 Foderrörsborrning, där foderröret dragits upp men ej utnyttjats som förlängningsrör.

- 2 Foderröret drivs ned till den nivå där filterröret skall börja. Filterröret placeras i foderröret och den fortsatta borrningen görs med excenterkrona eller genom spolning. Metoden används då det kan vara svårt att dra upp foderröret, Fig 9.3.

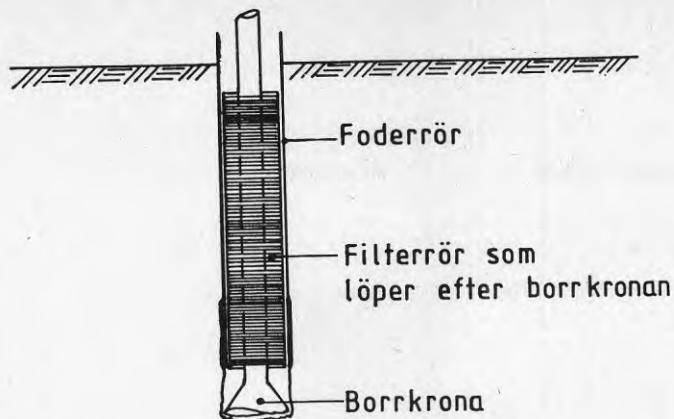


Fig 9.3 Placering av filterrör under borrhningens gång.

Om foderrörsborrning ej används kan följande metoder tillämpas:

- 3 Borrningen utförs till fullt djup varefter filterröret och förlängningsröret placeras i borrhålet, Fig 9.4.

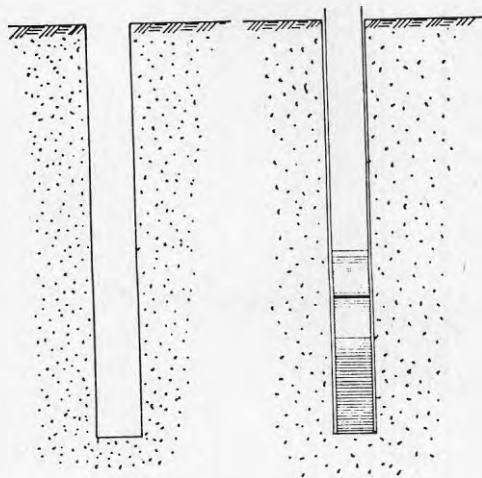


Fig 9.4 Borrning utan foderrör till fullt djup.

- 4 Förlängningsrör med filterrör spolas ned till önskat djup. Används främst för grunda brunnar med små dimensioner, t ex spetsrörbrunnar.

Om brunnen utförs med grusfilter placeras filterröret enligt metod 1 och 3 eventuellt med metod 2. Formationsfilterbrunnar kan utföras med samtliga metoder.

9.2.3 Filterfyllning

Filterfyllningen, dvs grusfiltret placeras efter det att filterröret centrerats på plats och samtidigt som foderröret dras upp. Centreringen av filterröret är ett mycket viktigt moment då risken finns att man får delar av brunnen med inget eller tunt lager av filtergrus. Under drift kan då sand komma att pumpas från formationen. Filtergruset skall placeras i små portioner så att en jämn packning erhålls. För att förhindra att olika kornstorlekar separeras under arbetet väljer man ett filtergrus med litet olikformighetstal d_{60}/d_{10} . I huvudsak kan man skilja mellan tre olika förfaranden för att placera grusfiltret på plats.

- Ett rör förs ned till den nivå där gruset skall placeras. Medan grus fylls på flyttas foderröret successivt uppåt, Fig 9.5.
- Gruset släpps från markytan. Detta är ej att föredra då separering av kornstorlekarna lätt fås (tyngre partiklar sjunker fortare än lätta partiklar), Fig 9.6.
- Gruset spolas ned med vatten under tryck. Metoden används främst vid djupa brunnar.

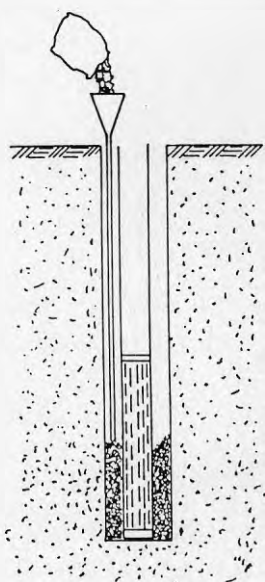


Fig 9.5 Placering av grusfilter via ett rör.

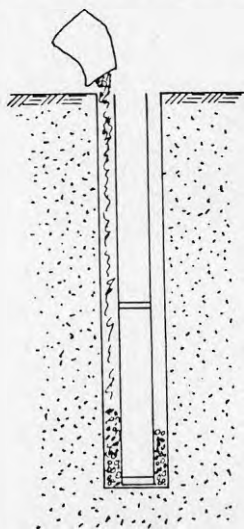


Fig 9.6 Placering av grusfilter från markytan.

Grusfiltret placeras i nivå ca 60 cm över den översta slitsen. Häröver läggs en tätmassa, eller finkornigare filtermaterial varefter det ursprungliga markmaterialet återfylls. Avståndet mellan den översta slitsen och överliggande finkorniga jordlager bör vara minst 60 cm. Eventuellt kan grusfiltret över slitsnivå minska i kornstorlek successivt för att ansluta till högre belägna jordarter. I Fig 9.7 visas en principskiss på grusfiltrets placering med tätning (se även fig 8.17).

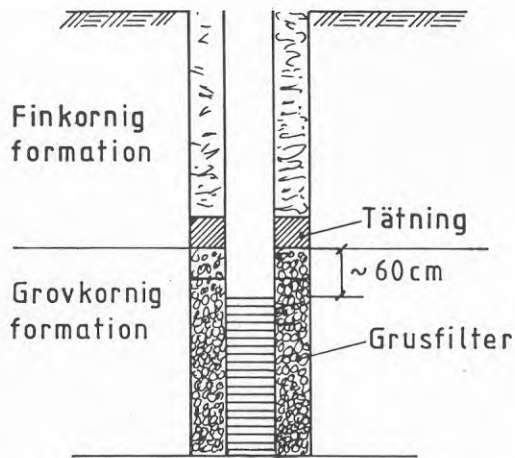


Fig 9.7 Placering av grusfilter och tätning.

9.3 Rensningsmetoder

9.3.1 Allmänt

För att en brunn skall ge maximal kapacitet måste den rensas. Brunnen rensas när den är nysatt, dvs ännu ej tagen i drift. Detta görs för att

- Ta bort den igensättning som uppstår närmast brunnen vid borrningen

- Öka akviferens permeabilitet närmast brunnen genom att öppna eller förstora passager i formationen så att vattnet kan transporteras friare

- Förhindra sandinträngning i brunnen

Efter en tids drift sjunker ofta kapaciteten på grund av igensättning i akviferen och brunnen. Den ursprungliga kapaciteten kan då helt eller delvis återfås genom att brunnen rensas.

Idag utnyttjas i Sverige huvudsakligen två effektiva rensningsmetoder för brunnar i jord: Manschett-pumpning och jetspolning. Metoderna kan kombineras med kemisk rensning. För rensning av bergborrade brunnar utnyttjas bl a pumpning, sprängning och högtryckspumpning.

En mekanisk rensning skall för att vara effektiv skapa en fram- och återgående rörelse i brunnsfiltret så att igensättningsprodukterna "rycks" loss från formation. Om rensningen utförs genom att enbart pumpa brunnen tills klart vatten erhålls kommer inte alla fina partiklar från brunnen och formationen att rensas bort p g a att bryggor bildas mellan jordkornen som förhindrar vidare transport av partiklar mot brunnen. Rensningen med manchett bör utföras på en del av filtret i taget, t ex sektioner om ca 1 meter. Om rensningen utförs på ett långt filter i ett steg blir

den anbringade kraften liten per längdenhet och brunnens effektivitet kommer att ökas i begränsad omfattning av rensningen.

Rensning med tryckluft är idag mycket vanligt. Då detta används måste man vara noggrann med att luft aldrig får tillföras brunnen i den slitsade filterdelen. Detta för att förhindra att luft tränger in i akviferen och sätter igen porerna.

9.3.2 Brunnar i jord

Rensningsförfarandet har olika syften vid brunnar med formationsfilter respektive grusfilter. Ett formationsfilter skapas genom att pumpa finare partiklar från formationen in i brunnen och sedan uppfordra dem. På så sätt bildas en zon med hög permeabilitet närmast filterröret. Vid utnyttjande av grusfilter placeras ett material med hög permeabilitet närmast filterröret varför finare material i någon större mängd ej behöver pumpas ut för att få bra flödesförhållanden. Man måste dock rensa bort den vägg av fina partiklar som bildats under borrningen. Då denna tätande hinna är belägen utanför grusfiltret kan problem uppstå att få bort den helt om grusfiltret är för tjockt.

Manschettpumpning

Manschettpumpning används för att rensa brunnar med perforerade eller kontinuerliga slitsar. Utrustningen består bl a av en rensningsmanschett, se fig 9.8, som avdelar ett stycke av filterröret, vanligtvis 0.5 m. Tryckluft är kopplat till manschetten och pumpningen tillgår så att den vilande vattenpelaren i brunnen lyfts upp mot markytan på grund av lufttillskottet, dvs samma princip som för en mammutpump. När vattenpelaren når markytan släpps trycket varvid vattnet faller tillbaka ner i brunnen. Förfarandet upprepas flera gånger, på detta sätt erhålls en fram- och återgående vattenrörelse genom filterröret och bryggor av finkorniga partiklar bryts ned, Fig 9.9. Strävan är att de finkorniga partiklarna och eventuella igensättningar närmast och i grusfiltret skall avlägsnas, Fig 9.10.

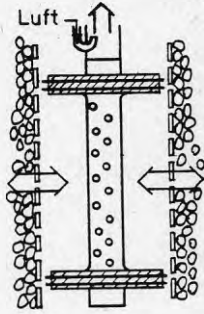


Fig 9.8. Renspumpningsmanschett.

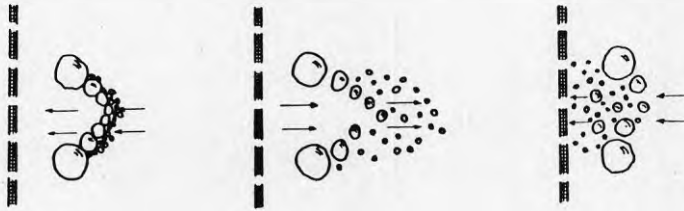


Fig 9.9 Nedbrytning av bryggor mellan kornen med en fram- och återgående vattenrörelse.

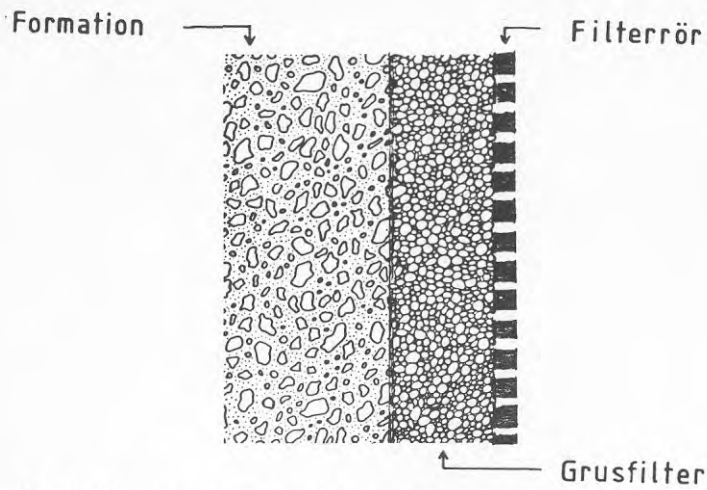


Fig 9.10 Grusfilter efter rensumpning.

Rensumpningen drivs så långt på varje nivå att ett klart vatten erhålls.

Tryckluftpumpningen fordrar, för att vara effektiv, ett viss mottryck vid luftinsläppet. Den vilande vattenpelaren ovanför manschetten bör därför vara minst två gånger större än avståndet från vilande vattenyta till utloppet, Fig 9.11.

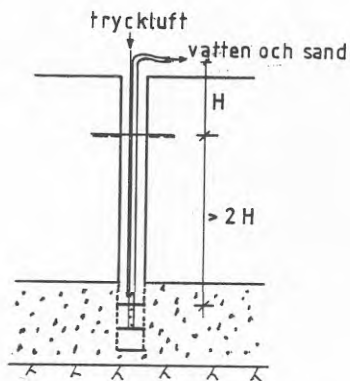


Fig 9.11 Rensning med manschett.

Jetspolning

Vid jetspolning spolas filterröret inifrån med vatten under högt tryck. Vattnet tillförs spolmunstycken, som roterar inuti brunnen för att hela filterröret skall rensas, Fig 9.12. Spoltrycket bör vara så högt att en vattenhastighet på ca 40-65 m/sek erhålles ur munstyckena, enligt tabell 9.1. En låg hastighet bör hållas om rensningen utförs i närheten av ett känsligt jordlager som t ex lera. Samtidigt med spolningen skall en vattenmängd som är ca 50% större än spolmängden pumpas ur brunnen. Med det uppumpade vattnet förs finkornigt material från formationen. På så vis bildas ett naturligt filter närmast brunnen med en kornstorlek som slitsvidden närmast filterröret. Kornstorleksfördelningen liknar sedan modermaterialet mer ju längre ut från filterröret man går. Normalt är det utbildade filtret ca 10 cm tjockt vid en väl utförd rensning, Fig 9.13.

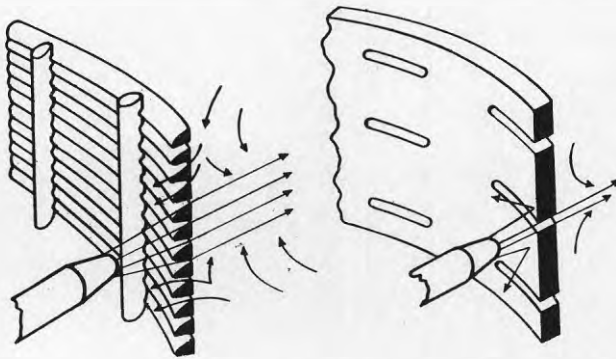


Fig 9.12 Jetspolning.

Tabell 9.1 Spoltryck och vattenmängder vid jetspolning.

Spoltryck								
p (bar)	7.5		10		15		20	
Munstycke Ø (mm)	v (m/s)	Q (l/s)	v (m/s)	Q (l/s)	v (m/s)	Q (l/s)	v (m/s)	Q (l/s)
5	40	0.8	45	0.9	55	1.1	65	1.2
6	40	1.1	45	1.3	55	1.5	65	1.8
9	40	2.5	45	2.9	55	3.4	65	4.0
12.5	40	4.8	45	5.5	55	6.6	65	7.7

Om spolningen utförs med en viss vattenvolym som cirkuleras via en bassäng, bör volymen på bassängen vara så stor att en stor del av finpartiklarna från det upp-pumpade vattnet hinner sjunka. Nedanstående tabell anger bassängens vattenvolym, V, som funktion av spolmängden Q i tabell 9.1.

Tabell 9.2

Q l/s	1	2	4	8
V m ³	4	8	16	32

Med denna volym bör partiklar större än ca 0,05 mm sjunka i bassängen. Vattendjupet på bassängen bör vara ca 1,5 meter. Helst bör bassängen utformas lång och smal så att avståndet mellan in- och utlopp blir stort. Inloppet bör gå via en makadam-bädd så att vattenstrålen fördelas i bassängkant. Utloppet bör ligga så högt som möjligt. Bassängen skall vara en behållare eller utformas med täta sidor och botten så att finpartiklar från markhorisonten inte rasar eller tränger in i bassängen.

En förutsättning för att jetspolning skall vara effektiv är att filterröret har kontinuerliga hydrauliskt väl utformade slitsar. I detta fall är metoden effektiv och kan användas både till grus- och formationsfilterbrunnar.

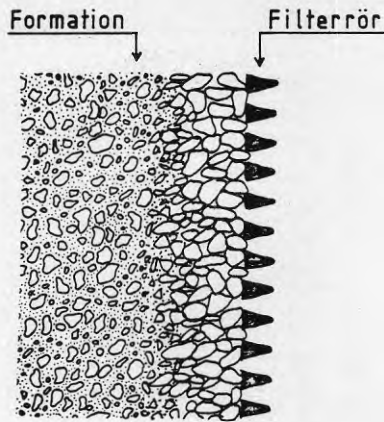


Fig 9.13 Formationsfilter efter rensumpning.

Kemisk rensning

Kemisk rensning av brunnar utnyttjas för att lösa upp eller lösgöra produkter som fastnat i brunnen eller på kornen i akviferen och som sänkt permeabiliteten närmast brunnen. En kemisk behandling skall utföras i kombination med eller åtminstone slutföras med en mekanisk rensumpning.

De typer av igensättningsprodukter som bör särskiljas är organiska respektive oorganiska ämnen. De oorganiska ämnena är vanligtvis järn - mangan - och kalciumföreningar.

De olika kemikalier som används för kemisk rensning kan grupperas enligt följande:

- Syror, sänker pH.
- Organiska syror, sänker pH och bildar komplex med t ex järn.
- Reduktionsmedel, sänker redoxpotentialen Eh.
- Oxidationsmedel, ökar Eh.

De tre första typerna används i första hand för att lösa upp oorganiska utfällningar t ex järn- och manganoxider. Den sista typen används för att oxidera organiskt material. Det är mycket vanligt att en utfällning består både av organiskt och oorganiskt material och man får då utföra rensningen i minst två steg, dvs en gång var med varje huvudtyp av kemikalie.

Exempel på kemikalier är:

- 1) Saltsyra, svavelsyra
- 2) Oxalsyra, ättiksyra, citronsyra
- 3) Natriumbisulfit
- 4) Natriumhypoklorit, calciumhypoklorit

I marknaden finns även speciella handelsvaror för kemisk rensning. Dessa varor är vanligtvis verksamma för någon speciell typ av utfällning. Man måste därför informera sig om kemikalies verkningssätt och sätta den i relation till den aktuella utfällningen.

De flesta kemikalier är korrosiva mot metaller, vilket man bör vara uppmärksam mot, speciellt om brunnen behandlas återkommande.

Koncentrationen på lösningen som skall verka i brunnen kan ej anges exakt. Man bör sträva efter att alltid ta upp utfällning och utföra test på laboratorie med olika koncentrationer och typer av kemikalier.

Exempel på koncentrationer som använts kan ges som vägledning:

Saltsyra	ca 5%	(dvs 50 g/l)
Svavelsyra	ca 5%	
Oxalsyra	ca 2%	
Ättiksyra	ca 10%	
Natriumbisulfit	ca 2%	
Natriumhypoklorit	ca 500 - 1000 mg Cl ₂ /l	

En kemisk rensning bör utföras enligt följande schema:

- a) Känsliga installationer tas upp ur brunnen. Kemikalie tillsätts med slang direkt till filterröret. Koncentration bedöms från fall till fall enligt ovan och doseras till en volym som fyller brunnens hela filterdel samt 1-2 m ut i formationen, Fig 9.14.

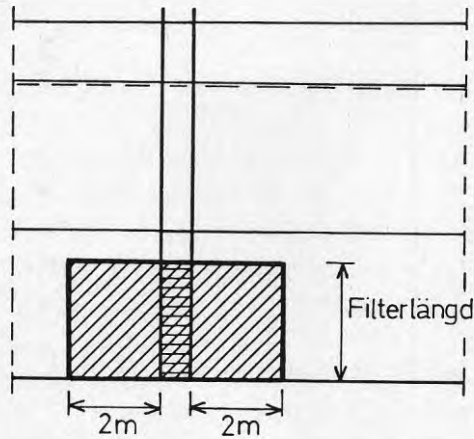


Fig 9.14 Den volym som skall fyllas med rensningskemikalie vid kemisk rensning.

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

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

- b) Tillsatt syra får verka under en tid av minst 12 timmar. Brunnen pumpas därefter till dess att uppfordrat vatten har ett så högt pH att mekanisk bearbetning är lämplig ($\text{pH}=4$). Det uppumpade vattnet neutraliseras innan det leds vidare från brunnplatsen.

- c) Brunnen rensas med någon mekanisk metod och pumpas till vattnets pH åter är normalt.

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

9.3.3 Bergborrade brunnar

Även bergborrade brunnar behöver rensas för att maximal kapacitet skall erhållas. Krossat berg blandat med vatten bildar en slurry som man måste få bort ur sprickorna. Ofta räcker det med att pumpa, ibland i kombination med syrabehandling. Speciella rensningsmetoder för bergborrade brunnar har dock utvecklats såsom sprängning och högtryckspumpning.

Sprängning

För att vidga sprickorna i berget kan sprängning användas. Effekten anses som tveksam och åsikterna går starkt isär hur sprängningen lämpligen bör utföras. En undersökning av sprängning av djupa sandstensbrunnar har visat att huvuddelen av den ökade kapaciteten beror på att borrhålet förstoras. Endast en liten del beror på att partiklar lossnar och bortförs från sprickor i berget. Man har uppskattat att kapaciteten endast förbättras med ca 10% genom sprängning. Sprängladdningen varierar runt ca 25 kg och bestäms utgående från avståndet till normalt bostadsbebyggelse enligt Arbetarskyddsstyrelsens spränganvisningar. Flera olika former av sprängning har provats för att nå goda resultat, t ex punktsprängning (endast en detonation), seriesprängning och en typ kallad vibrationsprängning.

Högtryckspumpning

Genom att trycka ut vatten under högt tryck i formationen vidgas befintliga sprickor och nya kan bildas. Då trycket lastas av rusar vattnet tillbaka och sprickorna återgår delvis till sin ursprungliga form. En rensningseffekt erhålls då vattnet rusar tillbaka mot brunnen då det drar med sig lösta partiklar och borrhax. Dessutom behåller sprickorna en del av utvidgningen genom att deras ytor förskjuts en aning varvid de ojämna sprickytorna får nya stödpunkter och på så vis håller sprickan öppen.

I Sverige har metoden använts på brunnar med liten kapacitet med goda resultat. Man utnyttjar ett tryck på 50-90 kp/cm² vilket anbringas och avlastas flera gånger.

9.4 Desinfektion

Efter att brunnen färdigställtts måste den desinficeras för att avlägsna bakterier som kan finnas i den. Bakterierna kan under drift dels orsaka växtlighet i filtret vilket försämrar strömningförhållandena vid brunnen, dels kan uttagsvattnet försämrans ur kvalitetssynpunkt. Varje gång brunnen öppnas på grund av reparation eller rengöring skall desinficeringen göras om innan driften upptas på nytt. Alla installationer i brunnen samt ledning till hydrofor eller lågreservoar måste innefattas av desinficeringen.

Redan under borrhningsarbetena kan man "hålla efter" bakterietillväxten genom att dosera lite desinfektionsmedel i brunnen innan arbetet börjar varje dag.

Som desinfektionsmedel används någon klorförening, vanligtvis natriumhypoklorit eller kalciumhypoklorit.

Natriumhypoklorit säljs som en flytande lösning och förekommer i olika klorkoncentrationer, t ex 15% och 25%. Lösningen åldras vid lagring varför man inte kan räkna med full klorstyrka efter ca 2-3 månader. Dosering i brunnen bör göras med en klorkoncentration på 50-200 mg/l.

Tabell 9.2 Liter klorlösning som krävs per m³ vatten för olika koncentrationer i brunnen.

Önskad konc i brunnen	Konc på handelsvara			
	10%	15%	20%	25%
50 mg/l	0.5	0.3	0.25	0.2
100 mg/l	1.0	0.7	0.5	0.4
150 mg/l	1.5	1.0	0.75	0.6

Klorlösningen skall ha en kontakttid i brunnen på minst två timmar men bör helst stå t ex över en natt. Om kloröverskotten då har sjunkit till noll krävs ytterligare behandling. För att resultat skall vara bra måste kloröverskottet i uppumpat vatten vara större än noll för att alla bakterier skall vara oskadliggjorda.

Kalciumhypoklorit säljs i fast form som tabletter och håller en klorkoncentration på ca 70 vikt-%. Även denna typ åldras vid lagring men ej i samma omfattning som natriumhypoklorit. Vid torr, kall och mörk förvaring kan varan lagras i maximalt tolv månader. Om tableterna ligger fuktigt förlorar de klor betydligt snabbare och blir dessutom mycket korrosiva.

Koncentrationen på 50-200 mg klor/l används för att desinficera brunnar. Tabell 9.3 visar hur mycket tabletter som krävs per liter vatten för att erhålla olika koncentrationer.

Tabell 9.3 Mängd torr 70%-ig kalciumhypoklorit som krävs per m^3 vatten för att erhålla olika koncentrationer.

Önskad koncentration mg/l	Torr kalciumhypoklorit g
50	70
100	140
150	210
200	290

Vid grusfilterbrunnar kan kalciumhypoklorit blandas med filtergruset varvid en långtidseffekt erhålls på desinficeringen. Som en tumregel har angetts att 1-4 kg kalciumhypoklorit bör blandas per m^3 filtergrus. Det bör dock påpekas att en sådan här behandling kan ge stötar av höga klorhalter, dvs smak- och lukstötar. Speciellt kan detta inträffa om brunnen pumpas intermittent. Kloröverskottet i brunnen bör kontrolleras under drift. För höga halter kontrollerar vanligtvis sig själv genom smak- och luktförändringar. Om vattnet ska ha en desinficerande verkan bör kloröverskottet vara 0.1 mg/l.

Klor är ett mycket starkt oxidationsmedel. Om brunnsvattnet innehåller höga järnhalter bör man därför undvika metoden att blanda kalciumhypoklorit i grusfiltret så att man ej får järnfällningar och igensättning av brunnen.

Vid mycket djupa brunnar kan kalciumhypoklorit vara att föredra. En lösning som släpps ned i en sådan brunn kan vara svår att få fördelad över hela längden med följden att vissa delar ej blir bakteriefria. Genom att fylla en "nätkasse" eller ett perforerat rör med kalciumhypoklorittabletter och sedan sänka och höja kassen sakta i brunnen tills tableterna lösts upp erhålls en desinficerande effekt i hela brunnsröret.

Allmänt gäller att då klorlösningen har reagerat i brunnen skall uppumpat vatten analyseras på kloröverskott. Om detta är noll måste klorbehandlingen göras om. Då brunnen är klar att tas i drift skall i konsumtionsbrunnar en vattenanalys göras för att klargöra om främst koliforma bakterier finns i uppumpat vatten.

9.5 Kapacitetstester

För att bestämma en brunns kondition och effektivitet utförs kapacitetstester. Dessa görs dels innan brunnen tagits i drift för första gången, dels med jämna intervall under driftstiden. I stort kan en kapacitetstest sägas gå ut på att bestämma avsänkningen i brunnen i relation till det uppumpade flödet.

Under drift sätter en brunn vanligtvis igen av olika produkter, vilket medför att för konstant uttag ökar avsänkningen i brunnen, dvs skinfaktorn ξ kommer att öka.

En igensättning kan aldrig enbart beskrivas med hjälp av flödesförändringar utan flödet måste alltid relateras till avsänkningen i brunnen. Avsänkningen i brunnen i relation till flödet benämns specifika kapaciteten Q/s_w .

Brunnens effektivitet har tidigare definierats med parametrarna effektivitetestäl η , igensättningstal N och igensättningsfaktorn $1-\eta$. Parametrarna kan bestämmas genom provpumpning eller infiltration.

Olika tillvägagångssätt finns, en metod medger absolut bestämning av igensättningsparametrarna och en metod är relativ och medger jämförelser vid olika tidpunkter.

Den absoluta bestämningen av brunnens effektivitet är beskriven i kapitel 4.35.

Genom pumpning erhålls avsänkningsförloppet för en viss kapacitet Q . Detta förhållande plottas enligt Theis och Jacob (Fig

4.21) varvid erhålls t_{of} och t_o . Skinfaktorn kan då beräknas enligt

$$\xi = 1.15 \log t_{of}/t_o$$

igensättningstalet N beräknas sedan enligt

$$N = \frac{\ln \frac{R_o}{r_w} + \xi}{\ln \frac{R_o}{r_w}}$$

$$n = \frac{1}{N}$$

Den relativa bestämningen ger inget exakt värde på igensättningsparametrarna utan man kan endast jämföra igensättningen vid olika tidpunkter. Då den specifika kapaciteten Q/s_w enbart är en funktion av områdets geohydrologiska förhållanden erhålls skinfaktorn erhålls enligt

$$n = \frac{\ln \frac{R_o}{r_w}}{\ln \frac{R_o}{r_w} + \xi} = \frac{(Q/s_w)_n}{(Q/s_w)_o}$$

$(\frac{Q}{s_w})_n$ = spec. kapaciteten efter driftstiden $t = n$
 $(\frac{Q}{s_w})_o$ = spec. kapaciteten vid tiden $t = 0$

Beroende på att avsänkingsförloppet är tidsberoende måste bestämningen av specifika kapaciteten ske efter noggrant schema för att metoden skall vara användbar. Bestämning av avsänkningen s_w vid tidpunkterna $t = 0$ och efter driftstiden $t = n$ skall således göras efter exakt samma pumptid vid varje test, t ex en timma. Avsänkningen mätes i relation till den nivå som råder i brunnen innan pumpstart vid det aktuella testet.

Effektivitetstalet η skall vara ≈ 1 för en bra brunn. Igensättningstalet, N , bör vara detsamma, dvs drygt ≈ 1 . Igensättningsfaktorn $1-\eta$ skall för en ny icke igensatt brunn vara nära noll.

En kapacitetstest kan som tidigare nämnts utföras under infiltration istället för uttag. Det är dock samma samband och resonemang som gäller. Avsänkningen byts dock ut mot en höjning av vattennivån i brunnen.

Stegprov-pumpning

En tredje metod att kapacitetstesta en brunn är genom stegprov-pumpning. Härvid testas brunnen med tre eller flera kapacitetssteg i följd, Fig 9.15. Genom att mäta avsänkningen som funktion av kapaciteten kan skinfaktorn ξ bestämmas.

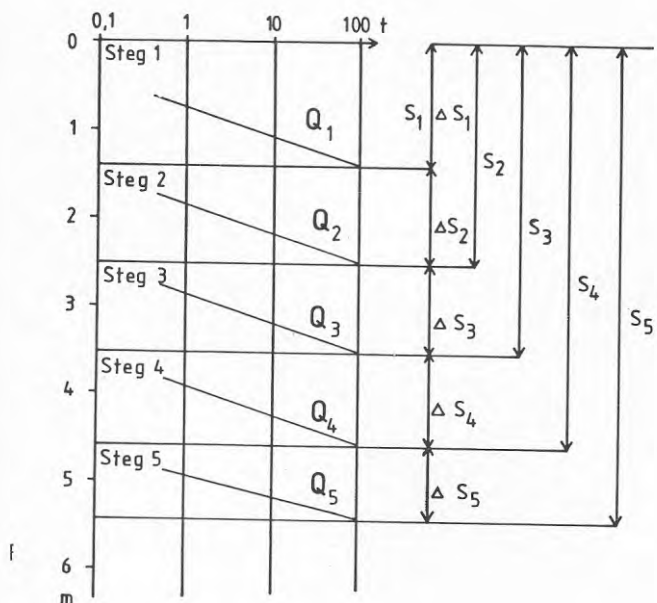


Fig 9.15 Stegprov-pumpning i 5 steg.

Enligt Jacob kan avsänkningen s_w i en brunn beskrivas genom

$$s_w = BQ + CQ^2$$

där BQ beskriver avsänkningen beroende på laminära förluster
 CQ^2 beskriver avsänkningen som beror av turbulenta förluster, se kommentar sid 4.19.

Brunnens effektivitet vid driftsstart och efter en tids drift kan därför observeras genom förändringen av faktorn B .

Genom att dividera ovanstående ekvation med Q erhålls

$$\frac{s_w}{Q} = B + CQ$$

Vid utvärderingen plottas s_w/Q som en funktion av Q , Fig 9.16. Härvid erhålls B som det vertikala avståndet mellan $Q = 0$ och den erhållna linjens skärningspunkt med s_w/Q -axeln. Faktorn C erhålls som lutningen på den räta linjen.

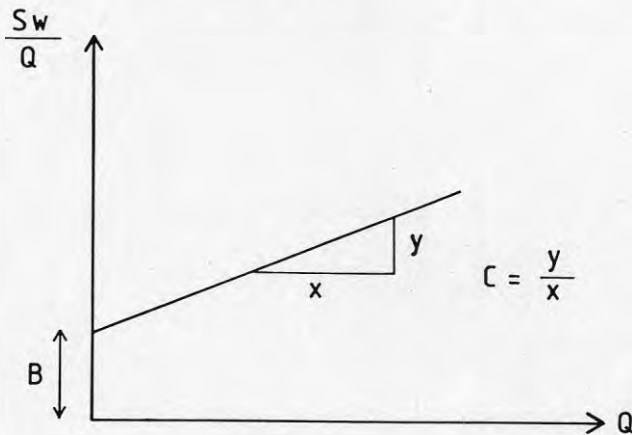


Fig 9.16 Utvärdering av stegprovpumpning.

Skinfaktorn ξ beskrivs sedan genom

$$B = \frac{\sigma + \xi}{2\pi T}$$

där

$$\sigma = \ln \frac{R_0}{r_w}$$

Genom observation av den turbulenta delen av avsänkningen (CQ^2) kan en kontroll erhållas av att den utnyttjade kapaciteten ej är för hög, dvs om de turbulenta förlusterna ökar kraftigt. Man bör dock påpeka att C-faktorn kan påverkas av grundvattenmagasinets gränser och pga att brunnen står i ett öppet grundvattenmagasin, se kap 4.23.

9.6 Byggnadsbeskrivning för brunn

Följande disposition kan utnyttjas vid upprättande av ett program för utförande av en brunn. Det bör dock tilläggas att varje enskild brunn kan kräva avsteg från detta exempel och får utformas olika från fall till fall.

För exemplet på sidan 8.28 har följande program upprättats.

PROGRAM FÖR UTFÖRANDE AV RÖRBRUNN VID X-KÖPING I X-STAD KOMMUN

- Bilaga 1 Planritning
- 2 Siktdiagram
- 3 Brunnsritning
- 4 Sugstycke för s k manschettpumpning

ALLMÄNT

Den kommunala vattentäkten i X-köping skall kompletteras med en rörbrunn i jordlager inom befintligt

vattentäktssområde, bilaga 1. Brunnen skall utföras som en formationsfilterbrunn vid undersökningsröret Rb 7601. X-köping är belägen ca 3 mil öster om X-stad.

Borrplatsen kan nås med lastbil. På platsen finns för brunnsentreprenaden erforderlig elkraft som tillhandahålles av beställaren. Vatten kan erhållas från vattenverket.

HÖJDSYSTEM

För borrhings- och brunnsarbetena gäller rikets höjdsystem 1970. Det vid borrplatsen kvarstående undersökningsröret Rb 7601 är beläget på nivån +65.62 (överkant rör).

JORDLAGRENS UPPBYGGNAD

Enligt upptagna jordprover har jordlagren vid Rb7601 följande uppbyggnad.

Djup under markytan	Jordlager
0.0 - 7.0	sandigt grus
7.0 - 9.0	(grusig) sand
9.0 -10.0	sand
10.0 -14.0	(grusig)siltig sand
14.0 -16.0	grusig sand
16.0 -20.0	sand
20.0 -21.0	siltig sand

De upptagna jordproverna redovisas i siktdiagram, bilaga 2. Provtagningen har utförts med ett 50 mm stålrör med spets. Spetsen var försedd med 20 mm hål på en längd av 0.5 m. Jordmaterial med kornstorlek över 20 mm finns inte i proverna, varför säkra uppgifter om sten och blockhalt inte kan anges. Jordproverna har uppfordrats med tryckluft.

GRUNDVATTENYTAN

Grundvattenytan vid Rb 7601 var 1975-08-09 7,2 m under my dvs på nivån +57.20.

BORRNINGARBETEN

Från markytan belägen på +65.4 skall borrning utföras med \emptyset 400 mm till nivån +44.4.

Vid drivning med foderrör får jordmaterialet ej tas upp under rörets underkant. Likaså får inte vattenståndet i borrhöret sänkas under borrarbetena. Skulle sprängningsarbeten bli nödvändiga får dessa under inga omständigheter ske utan samråd med beställarens kontrollant.

Borrningen skall utföras med minsta möjliga avvikelse från lodlinjen. Om avvikelsen överstiger 5%, skall omedelbar kontakt tagas med kontrollanten.

Representativa jordprover skall fr o m 10 m under markytan tas upp på varje meter. Under borrarbetena mätes och protokollföres vattenståndet i borrhålet varje dag innan arbetena påbörjas. Borrprotokoll skall dessutom föras över borrarbetena med angivande av genomborrade lager mm, som kan vara av intresse för den fortsatta grundvattenprospekteringen.

BRUNNSUTFORMNING

I borrhålet skall filter- och förlängningsrör centreras på angivna nivåer. Filterröret skall vara rostfritt stål SIS 2333 med kontinuerlig slits med slitsbredden 0.5 mm. Förlängningsröret och sumpröret skall även de utföras i rostfritt stål SIS 2333, godstjocklek 4 mm. Samtliga rör skall ha en ytterdiameter \emptyset 360 mm.

Brunnen skall nedifrån räknat bestå av följande delar, se även bilaga 3

bottenplatta	
sumprör, längd 2 m	+44,4 - +46.4
filterrör, längd 6.5 m	+46.4 - +52.9
förlängningsrör, längd 12.5 m	+52.9 - +65.4

Till brunnen skall även höra ett skyddslock \emptyset 400 mm som skall sättas över förlängningsröret. Röret skall vara av minst 2.0 mm plåttjocklek och vara försett med ett påsvetsat 2"-rör med lock för vattenståndsmätning, bilaga 3. Skyddslocket skall vara låsbart.

Sedan filter- och förlängningsrör monterats, lyfts borröret med största försiktighet så att brunnsröret inte skadas.

RENSPUMPNING

När filterröret frilagts, utföres rensumpning av filtret genom intermitterent s k manschettumpning med mammutpump. Sugstycket med manschetter skall ha ca 0.5 m längd och manschetterna skall ha god anslutning till brunnsröret. Rensumpningen påbörjas i filterrörets nederdel och sedan klart, sandfritt vatten erhållits, förflyttas sugstycket successivt uppåt.

Sedan rensumpningen slutförts, borttages eventuellt kvarbliven sand från brunnens botten med mammutpump. Rensumpningen avslutas med ett maximalt vattenuttag under ca 1 timme dagen före den egentliga kapacitetsbestämningens början.

I samband med rensumpningens slutfas skall brunnen desinficeras för att erhålla en bakteriefri brunn. Desinficeringen utföres genom att hålla 2 liter 20%

natriumhypokloritlösning och kort därefter 4 m³ vatten i brunnen och låta lösningen verka i ca två timmar. Efter denna kontakttid pumpas minst ca 4 m³ vatten upp ur brunnen. På detta vatten skall prover tas på vilka kloröverskottet kontrolleras. Kloröverskottet bör överstiga noll i annat fall måste desinficeringen upprepas.

BESTÄMNING AV BRUNNENS KAPACITET

För bestämning av brunnens kapacitet kan lämpligen en undervattenpump med en minsta kapacitet på 30 l/s användas. Kapacitetsbestämningen utföres som stegprov-pumpning, där den maximala kapaciteten uppnås med 5 steg och 1 timmes längd vardera. Vattenuttagets storlek under varje steg kommer att meddelas efter det att resultaten av rensolningen föreligger. Vattenuttagets storlek bestäms noga och hålles konstant under varje steg. Vattenståndet i brunnen mätes enligt följande tidsschema under varje pumpsteg:

Pumpperiod	Mätintervall
0 - 10 min	1 min
10 - 20 min	2 min
20 - 60 min	5 min

Provpumpningen skall ske i samråd med kontrollanten för brunnsarbetena.

SAMRÅD MED BESTÄLLARE

I god tid före arbetenas påbörjande skall beställaren underrättas om dag för påbörjandet.

Skulle arbetet med brunnen medföra kostnader som inte inkluderas i anbudssumman skall kontrollanten underrättas härom innan dessa arbeten eller ändringar vidtages.

Alla avvikelser eller ändringar av betydelse skall ske i samråd med kontrollanten. Om så ej sker utfås ingen extraersättning.

Borrningsentreprenören skall underställa sig av beställaren påfordrad kontroll av arbetena och till brunnen levererat material.

Y-stad 1976 04 04
Konsultfirman Grundvatten

9.7 Dokumentation

När en brunn är färdigställd för att tas i drift bör anläggningen nogga dokumenteras.

Varje arbete som skall utföras i framtiden på anläggningen kommer väsentligt att underlättas om en samlad bild av brunnen kan erhållas.

Dokumentationen bör innefatta de utredningar som utförts i samband med undersökningar för utförandet av brunnen. I de fall att avsteg gjorts från dessa utredningar skall detta noggrant anges. Dokumentationen skall innehålla:

- Brunnens läge i plan och profil
- Brunnens dimensioner
- Filtorrörets utformning
- Filtertyp
- Material i brunnsrören
- Rensningsmetod
- Kapacitetstest i samband med färdigställandet av brunnen
- Desinfektion av brunnen
- Borrningsmetod
- Tid för utförande av brunnen
- Data om grundvattnets sammansättning

Grundvattennivådata
Provpumpningsdata
Den geologiska formationens uppbyggnad. Siktkurvor
Metod för jordprovtagning
Pumptyp och pumpkaraktistika
Data för övriga installationer
Eventuella kommentarer om brunnen som framkommit under utförandet av brunnen

Varje senare åtgärd eller arbete med brunnen bör antecknas till dokumentationen.

Enligt lagen om uppgiftsskyldighet vid grundvattenundersökning och brunnsborrning (SIS 1975:424) skall data om borrhningsarbetena insändas till Sveriges Geologiska Undersökning, SGU. Vanligtvis verkställs detta genom brunnsborrharen om sådan anlåtats. I annat fall kan det vara lämpligt att översända t ex dokumentationen till SGU. Observera att även undersökningsborrningarna skall redovisas till SGU.

10.1 Allmänt

Att uppfordra vatten från brunnar har varit ett behov i hundratalens år och utvecklingen har därför varit kraftig inom detta område. Uppfodringsanordningar har genomgått en utveckling från hink och manuelle pumpar till dagens elektriska pumpar. Helt naturligt har det skrivits en hel del om pumpar varför den intresserade läsaren hänvisas till speciallitteratur. Vi har här valt att endast belysa det mest elementära.

I en pump överförs rörelseenergi från pumpen till lägesenergi hos vattnet dvs vattnet lyfts upp en höjd motsvarande $\eta \cdot E$ där η = pumpens verkningsgrad och E = den tillförda energin, Fig 10.1. Vattnets energilinje kan beskrivas med Bernoullis ekvation. Vid en förenkling av denna erhålls:

$$H_m = H_s + H_f$$

där H_m = total manometrisk uppfodringshöjd
 H_s = statisk uppfodringshöjd
 H_f = total strömningsförlust

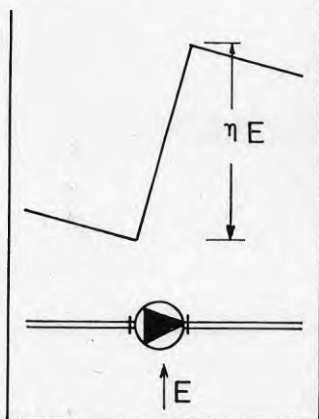
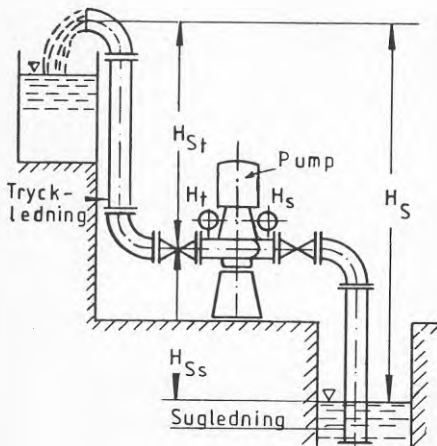


Fig 10.1 Pumpens arbetsprincip.

Den statiska uppfodringshöjden H_s dvs den höjd man önskar lyfta vattnet med pumpen, kan delas upp i en sughöjd och en tryckhöjd enligt Fig 10.2.



H_{s_t} = statisk tryckhöjd i m

H_{s_s} = " sughöjd i m

H = " uppfodringshöjd i m

$$H_s = H_{s_t} + H_{s_s}$$

Fig 10.2 Pumpens lyfthöjder.

10.2 Effekt, verkningsgrad och pumpkaraktäristika

Motorn till pumpen har en verkningsgrad η dvs den tillförda energin E från motorn resulterar i en höjning av energilinjen H_m som motsvarar

$$\eta \cdot E = \varphi \cdot g \cdot V \cdot H_m$$

Motorns effektbehov $p = \frac{E}{s}$ insätts i ovanstående ekvation vilket ger

$$p = \frac{\varphi g Q H_m}{\eta}$$

där φ = vattnets densitet (kg/m^3)

g = $9.81 \text{ (m/s}^2\text{)}$

V = den volym vatten som skall pumpas (m^3)

s = den tid som pumpen skall arbeta (s)

Q = V/s kapacitet (m^3/s)

I pumpkataloger anges pumpens verkningsgrad och effektbehov som funktion av kapaciteten, Fig 10.3. Dessutom anges pumpens arbetsområde, dvs pumpens uppfodringshöjd, H , relativt kapaciteten Q . Detta förhållande mellan Q och H benämns pumpkaraktäristika.

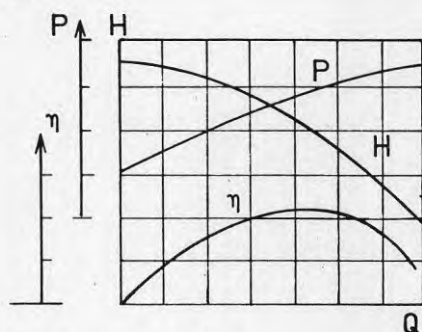


Fig 10.3 Pumpkaraktäristika.

Vid dimensionering av en pump vill man finna den pump som har hög verkningsgrad och lågt effektbehov vid given kapacitet och uppfodringshöjd.

10.3 Olika pumptyper

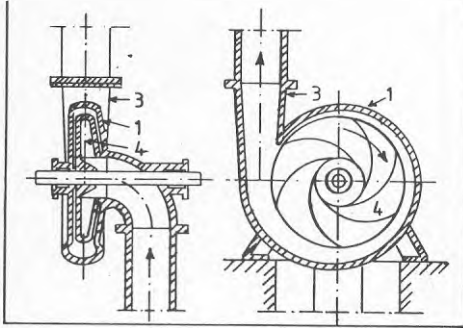
10.3.1 Allmänt

För att uppfodra vatten från djupa grundvattenbrunnar används vanligtvis dränkbara centrifugalpumpar för stora kapaciteter och ejektorpumpar för små kapaciteter. För uppfodring av vatten från grunda brunnar utnyttjas markuppställda centrifugalpumpar.

10.3.2 Centrifugalpump

En centrifugalpump består, enligt Fig 10.4 och 10.5 av ett pumphus med ett eller flera roterande pumphjul. Vattnet går från hjulets centrum och slungas ut mot dess periferi. Härvid förvandlas vattnets rotationsenergi till tryckenergi. Centrifugalpumpar kan indelas i tre olika grupper beroende på vattnets strömningsriktning genom pumphjulet. Dessa tre typer är radialpumpar,

diagonalpumpar och axialpumpar. Pumpkaraktistikan för de olika typerna framgår av Fig 10.6.



- 1 PUMPHUS (snäcka) HAR VANLIGEN FORM AV EN SPIRAL.
- 2 SUGSTUDS
- 3 TRYCKSTUDS
- 4 PUMPHJUL MED SKOVLAR. FÖR AXIALPUMPAR ÄR HJULET EN PROPELLER.

Fig 10.4 Markuppställd centrifugalpump.

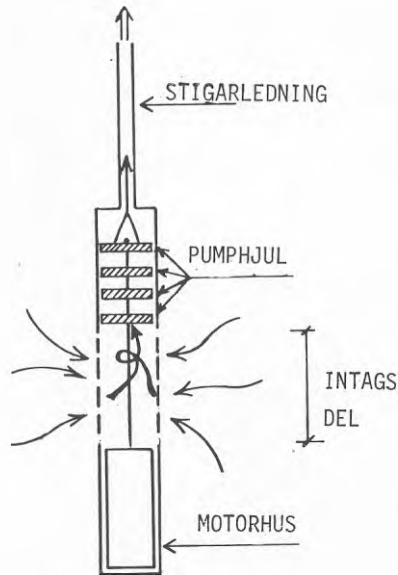


Fig 10.5 Dränkbar centrifugalpump.

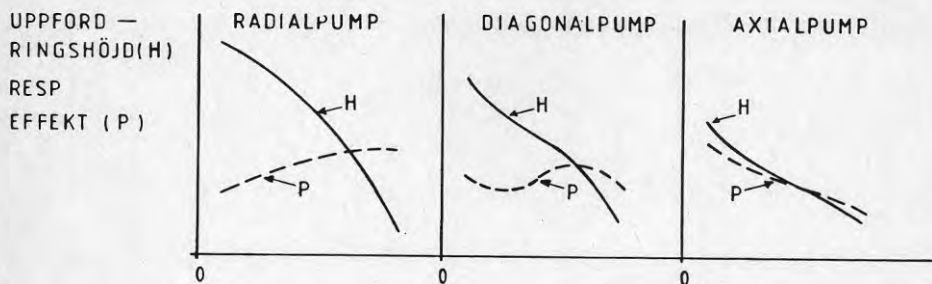


Fig 10.6 Centrifugalpumpens karakteristika.

Radialpumpen är effektivast vid stora uppfordringshöjder och små kapaciteter. Axialpumpen däremot är effektivast vid stora kapaciteter och små uppfordringshöjder.

Vid markuppställda pumpar utnyttjas sughöjden för att uppfordra vattnet. För detta ändamål är radialpumpen bäst lämpad.

Den teoretiska sughöjden är ca 10.3 m men på grund av strömningsförluster blir den verkliga sughöjden mindre, ca 6-8 m. Om trycket i sugledningen blir mindre än ångbildningstrycket kokar vattnet och s k kavitation uppstår med stora skador på pumpen som följd.

10.3.3 Ejektorpump

Ejektorpumpen Fig 10.7 består bl a av ett litet vattenfyllt rör som går från hydroforen ned till den nivå från vilken vattnet skall uppfordras. Vätskestrålen från denna drivs med hög hastighet genom en dysa ut i en venturiformad diffusor. Härvid uppstår ett undertryck varvid vätskan som pumpen är nedsänkt i sugns in i pumpen. Denna vätska stiger sedan upp i stigarledningen motsvarande den nivå som vattnet står i det lilla röret. För att trycka vattenstrålen genom dysan med hög hastighet, övervinna strömningsförlusten i rören och för att få erforderlig tryck i hydroforen utnyttjas en markuppställd centrifugalpump. Karakteristikan framgår av Fig 10.8.

Denna typ av pump utnyttjas för enskilda hushåll dvs för små kapaciteter och stora uppfodringshöjder.

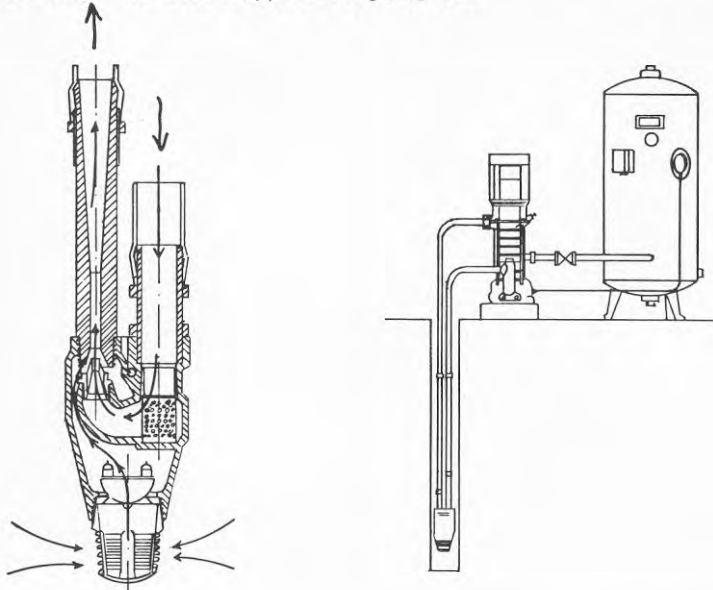


Fig 10.7 Ejektorpump.

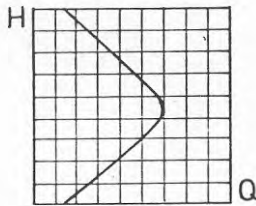


Fig 10.8 Pumpkaraktistika för ejektorpumpen.

10.3.4 Dimensionering

Enligt tidigare väljs en pump för en önskad kapacitet och uppfodringshöjd vid pumpens högsta verkningsgrad. Om inte denna punkt kan uppnås måste en annan pump väljas eller så måste pumpen regleras genom att ändra antal pumpar i drift eller genom reglering av pumpens varvtal. Vanligtvis regleras dock endast

pumparna på ledningsnätet och pumpen i brunnen väljs så bra som möjligt.

Man bör observera att materialet i pumpen är lika viktigt som materialet i brunnsrören med tanke på t ex korrosion.

10.3.5 Parallelldrift

Vid parallelldrift av två eller flera pumpar kan en pumpstation köras med varierande kapaciteter. Karakteristikan konstrueras som summan av de båda kapaciteterna vid samma tryck enligt Fig 10.9.

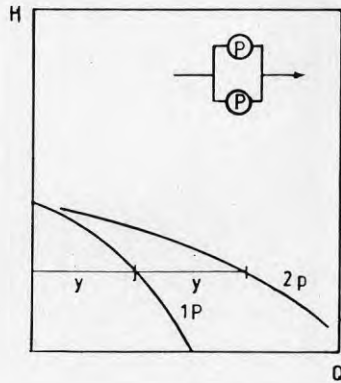


Fig 10.9 Parallelldrift för att få ökad kapacitet.

10.3.6 Reglering av varvtal

Reglering av pumpens varvtal ger en förändrad pumpkarakteristika.

För beräkning av nya pumpdata kan följande förhållanden och Fig 10.10 utnyttjas:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{w_1}{w_2}$$

w_1 = varvtal innan reglering

w_2 = varvtal efter reglering

$$\frac{H_1}{H_2} = \frac{w_1^2}{w_2^2}$$

Q = kapacitet

H = uppforderingshöjd

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{w_1^3}{w_2^3}$$

P = effekt

η = verkningsgrad

$$\frac{\eta_1}{\eta_2} = 1$$

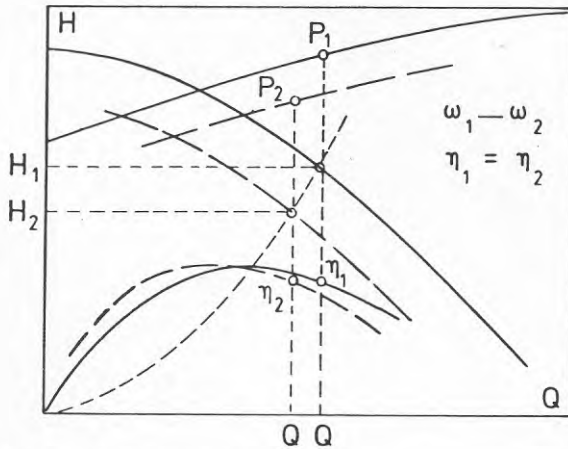


Fig 10.10 Varvtalsreglering.

Varvtalsreglering utförs med reglerbara elmotorer.

10.4 Installationer

De installationer som krävs utöver pump beror på ändamålet med brunnen. Vi föredrar att i redovisningen skilja på uttagsbrunnar för vattenförsörjning och infiltrationsbrunnar. Andra användningsområden kan naturligtvis kräva andra installationer.

Installationer i marknivå bör skyddas mot väder och vind samt mot åverkan. De förläggs därför i någon typ av överbyggnad, i eller under marknivå.

10.4.1 Uttagsbrunnar

En uttagsbrunn bör i princip vara utrustad med följande installationer, Fig 10.11.

- Manometer, för kontroll av vattentryck, 1
- Avstängningsventil, 2
- Avluftningsventil med luftklocka, 3
- Vattenprovtagningsskran för kontroll av vattenkvalitet, 4
- Nivåvakt, för kontroll av vattennivån i brunnen samt automatik för pumpen, 5
- Vattenmätare, för kontroll av uttagen vattenmängd, 6
- Backventil

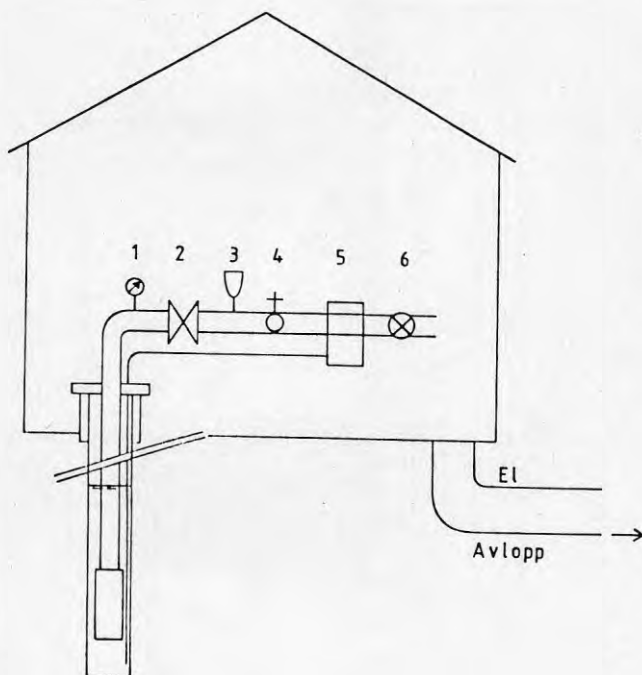


Fig 10.11 Exempel på installationer till en uttagsbrunn.

Brunnsöverbyggnaden kan utföras som en byggnad över markytan eller nedsänkt under marknivå. Storleken på skyddsbyggnaden bör vara sådan att man bekvämt kan komma åt samtliga installationer och så att rensumpning och reparationer kan utföras.

Byggnaden bör vara utrustad med

- lyft-don
- belysning
- ventilation samt
- avlopp, för bortförande av rensnings- eller spolvatten

För grävda enskilda brunnar krävs i allmänhet ingen speciell överbyggnad då samtliga installationer vanligtvis placeras i boningshuset.

Brunnen och överbyggnaden måste vara utförd så att föroreningar ej kan tränga in i brunnsröret, dvs med ett helt tätslutande låst lock. Det är mycket vanligt att brunnsröret mynnar under markytan i ett större cementrör. Slangar och kablar från pumpen är dragna via cementröret och förhindrar ofta att ett tätt lock läggs på brunnsröret. Då avlopp ofta saknas från cementröret stiger dagvattnet utanför brunnsröret och bräddas ned i brunnen och förorenar vattnet, Fig 10.12.

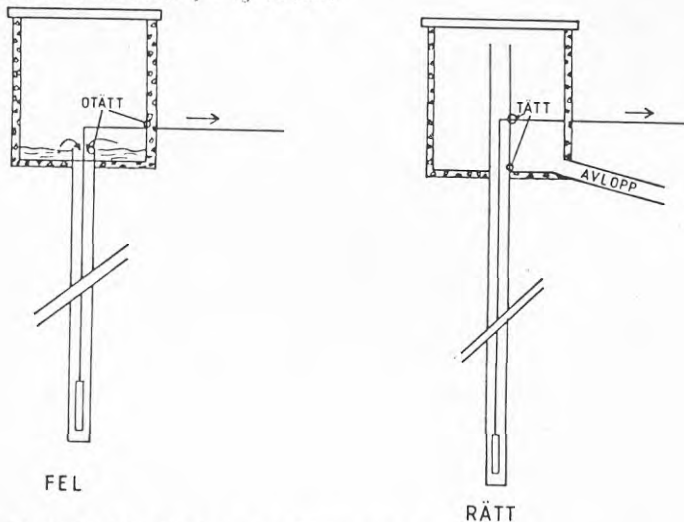


Fig 10.12 Risk för läckage av förorenat vatten.

Detta förhållande är mycket vanligt och mycket olämpligt. Oftast förekommer det vid bergborror för enskild förbrukning.

I marknaden finns t ex tätningshuvar för att förhindra inläckage av föroreningar till brunnsröret. Man kan också välja en annan konstruktion t ex genom att dra upp brunnsröret längre och anordna ett avlopp från cementröret.

Marken runt brunnen bör vara upphöjd och luta från brunnen så att allt vatten dräneras ut från brunnen i alla riktningar. Dessutom bör markskiktet vara tätt, t ex en platta av betong. Avloppsvatten från brunnen från t ex rensningarna får ej infiltrera i marken vid brunnen utan måste forslas bort från brunns närhet. Tätningen runt brunnen måste dock tillåta brunnsröret en viss rörelsemöjlighet.

10.4.2 Infiltrationsbrunnar

Infiltrationsbrunnar skiljer sig i vissa delar från uttagsbrunnar vad avser installationer.

Vatten tillförs brunnen via en pump eller om grundvattennivån står långt under markytan kan det vara tillräckligt att höja vattennivån i brunnen för att erhålla tillräckligt tryck. Vattnet bör alltid tillföras brunnen genom ett speciellt infiltrationsrör, Fig 10.13. Detta rör skall mynna under lägsta vattennivå i brunnen och det måste alltid stå under tryck för att ej dra in luft från atmosfären till brunnen. Genom att utföra röret med en förträngning i mynningen i brunnen kan detta enkelt ordnas. Infiltrationsvattnet får aldrig tillföras brunnen genom fritt fall då luft kommer att dras med vilket kan sätta igen filterdelen.

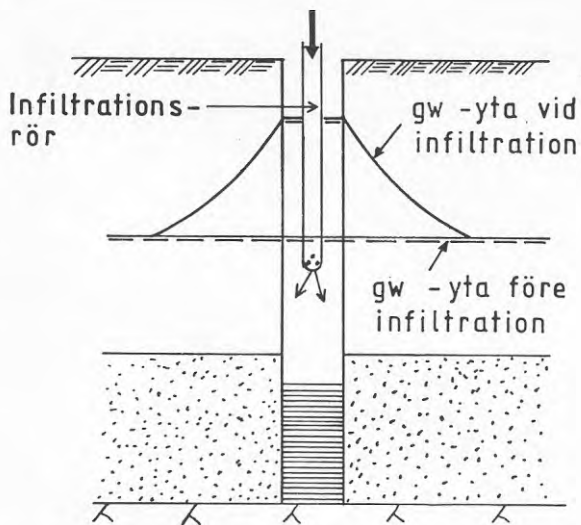


Fig 10.13 Tillförsel av infiltrationsvatten.

Övriga installationer är, Fig 10.14

- Vattenmätare, för kontroll av infiltrerad mängd
- Manometer, för kontroll av vattentrycket
- Reduceringsventil, för reglering av vattentrycket
- Provtagningskran, för provtagning av infiltrationsvattnet
- Backventil och avstängningsventil
- Eventuella installationer för behandling av infiltrationsvattnet
- Automatisk avluftningsventil

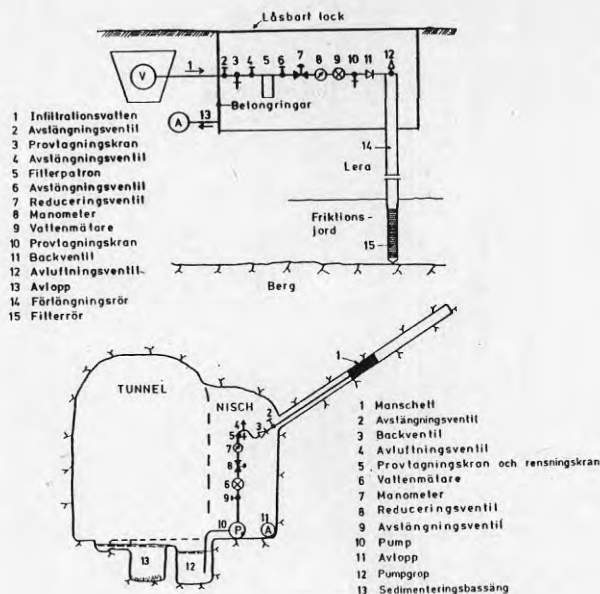


Fig 10.14 Exempel på två olika infiltrationsanläggningar.

Installationerna placeras på någon skyddad plats t ex i nedgrävd brunnskammare, närbelägen byggnad eller i någon nisch i t ex en tunnel. Platsen skall liksom vid uttagsbrunnar vara utrustad med

- ventilation
- belysning
- avlopp

Av Fig 10.14 framgår två olika utföranden av en infiltrationsanläggning. I det ena fallet utnyttjas kommunalt försörjningsvattnet för infiltraion i jord. Det andra utförandet visar infiltration i berg med uppsamlat läckagevatten.

11.1 Tillsyn och skötsel

Brunnar måste kontrolleras och skötas med jämna intervall. Intervallens storlek varierar från brunn till brunn. Olika typer av kontroller och observationer kan göras. Helst vill man hålla kostnaderna nere och börjar därför med enklare och billiga metoder. Vissa kontroller görs fortlöpande för att undvika problem medan andra åtgärder sätts in för att spåra orsaken och omfattningen av en redan uppkommen störning.

För försörjningsbrunnar måste alltid tillses att vattnets kvalitet är tillfredsställande. Denna kontroll utförs mycket bra av vattenförbrukarna och genom rutinundersökningar. Det är i allmänhet för sent att åtgärda en igensättning eller kvalitetsförsämring då det gått så långt att vattnets kvalitet kraftigt försämrats. En åtgärd bör sättas in på ett tidigt stadium. Helst bör noggranna studier av vattenanalyser göras fortlöpande så att förändringar upptäcks i tid. Förändring i kvaliteten kan bero på yttre föroreningskällor eller förändrade strömningsförhållanden som inte har med själva brunnskonstruktionen att göra och behandlas inte här.

Om vattnet t ex innehåller sand och rostpartiklar kan begynnande korrosion på brunnen misstänkas. Ger brunnen järnhaltigt vatten stötvis i kombination med sjunkande vattentyta i brunnen kan detta tolkas som en igensättning av brunnsfiltret p g a järnfällning. Enklaste metoder är således att studera vattenkvalitet i kombination med vattennivån i brunnen. Vid konstant pumpkapacitet kan en med tiden sjunkande vattennivå i brunnen tyda på någon av följande två orsaker

- Om grundvattennivån i grundvattenmagasinet utanför brunnen är konstant har brunnen börjat sätta igen.

- Sjunker grundvattennivån utanför brunnen i samma omfattning som i brunnen är orsaken ett för stort grundvattenuttag från akviferen och pekar ej på någon driftstörning hos själva brunnen.

För infiltrationsbrunnar sker inte driftskontrollen lika bekvämt genom några konsumenter. En igensättning observeras då specifika kapaciteten sjunker. Det vill säga det erforderliga trycket över brunnen och akviferen ökar vid oförändrat infiltrationsflöde. Genom att observera infiltrationstryck och -flöde med återkommande intervall kan en igensättning observeras i tid. Denna mycket enkla kontroll kan dock ge falskt alarm om man inte skiljer mellan trycket i brunnen och trycker över brunnen. Då grundvattentrycket utanför brunnen kan stiga under infiltrationens gång kan man inte enbart studera tryckets förändringar i brunnen utan det är tryckskillnaden mellan brunnen och akviferen som skall studeras.

Om en igensättning misstänks bör orsaken och omfattningen spåras innan rensningsmetod väljs. Genom att utföra en kapacitetstest kan omfattningen av igensättningen bestämmas. Om igensättningen endast drabbat en del av brunnsfiltret kan en TV-filmning eller flödesloggning över filterrdelen ge information om olika sektioners kondition. En filmning kan ge svar på frågor som var igensättningen är (färg på igensättningen) samt filterrörets och slitsarnas utseende.

En kapacitetstest utföres enligt kapitel 9. Som tumregel brukar anges att effektivitetstalet η ej får sjunka lägre än till 0.5. Detta motsvaras av att specifika kapaciteten sjunker med 50%. Igensättningstalet får därmed inte bli större än 2 och skinfaktorn ej större än ca 7. Om en igensättning har erhållits som motsvarar en ökning av igensättningstalet till 2 bör brunnen rensas för att dess effektivitet skall bli tillfredsställande. Rensning kan utföras med mekanisk eller kemisk metod enligt kapitel 9.

En kapacitetstest skall göras med återkommande intervall, t ex en gång vart 2-3 år för att den säkert skall föregå en igensättning. Före driftsstart av en brunn skall alltid en kapacitetstest utföras för att en jämförelse skall kunna göras med testresultat efter en tids drift. Genom att utföra en absolut bestämning av effektivitetstalet från start kan en kontroll av utförandet av brunnen fås. Om testet utförs genom stegprov pumpningen kontrolleras dessutom brunnens funktion för hela dess arbetsområde, både låga och höga flöden.

Förutom att en igensättning måste spåras i tid måste andra delar av anläggningen skötas. Installationer som pump, ventiler, vattenbehandlingsanordningar, ledningar mm kan fungera dåligt och därför begränsa brunnes effektivitet. Tillsyn en gång per vecka/månad är därför lämpligt av sådana installationer. En gång per år bör normalt installationerna rengöras.

Infiltrationsbrunnar måste ofta ha ett tätare kontrollschema då driftsstörningar ofta ej uppmärksammas förrän vid kontrollerna.

Sammanfattningsvis kan således bl a följande metoder användas för att upptäcka eventuella framtida driftsstörningar:

- vattenkvalitetens förändring
- vattennivån i brunnen och dess omgivning
- kapacitetstest
- filmning

Genom regelbunden tillsyn av brunnen och dess installationer kan minskande effektivitet och många driftsstopp undvikas. Helst bör ett skötselprogram upprättas för varje enskild brunn. Till grund för detta bör ett par års observationer ligga.

11.2 Ekonomi

Kostnader och ekonomi för en brunn kan delas upp i fasta anläggningskostnader och driftskostnader.

Anläggningskostnaderna består av kostnader för material som filterrör, förlängningsrör, pump, installationer, borrningskostnader samt rensningskostnad. Till denna del kan även projektering och dimensionering av brunnen tillföras. Kostnaderna varierar naturligtvis med brunnens djup, diameter, konstruktion mm och är svåra att ange generellt. En studie av anbud för ett flertal brunnar som utförts i Sverige under 1975-76 har gett en kostnadsbild enligt Fig 11.1. Det bör vara rimligt att anta att den reella kostnaden är 10-20% högre. Några uppgifter om detta förhållande saknas dock.

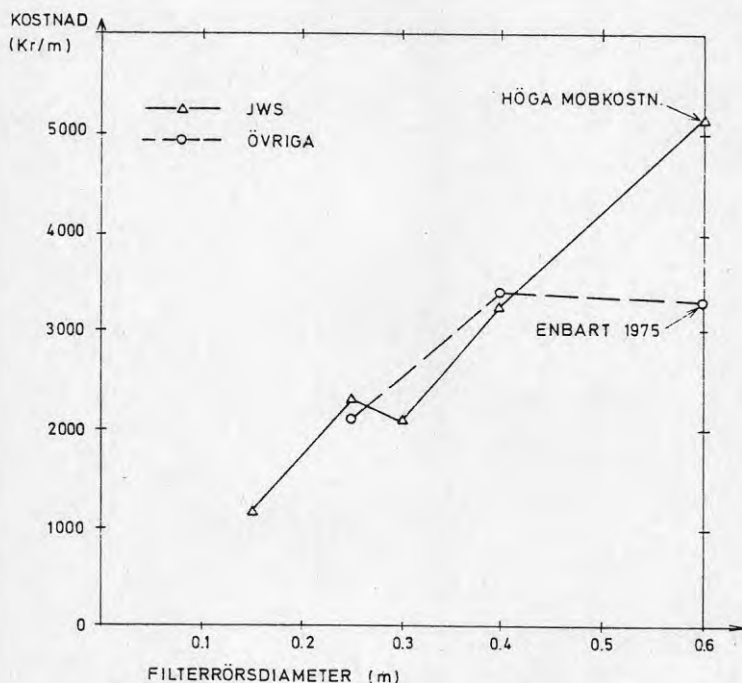


Fig 11.1 Kostnader per meter för att utföra brunnar av perforerad typ (övriga) samt Johnson Well Screen (JWS).

Driftskostnaderna består av kostnader för pumpning, tillsyn, kapacitetstest med utvärdering samt rensning.

För att exemplifiera de olika kostnaderna redovisas här för en jordborrad rörbrunn med diameter 400 mm och djupet 21 m. Filterrörets längd sätts till 6.5 m enligt exempel i kapitel 8.

<u>Projektering</u>		25 000:-	
<u>Dimensionering</u>		5 000:-	
<u>Anläggningskostnad</u>			
Borrning	}	3 500:- per m	73 500:-
Sättning av filterrör			
Rensning			
Filterrör			
Förlängningsrör	}		
Pump			
Övriga installationer			
Pumphus			50 000:-
 <u>Driftskostnader</u>			
Energi			
Kapacitetstest 1 gång/3 år		5 000:-	1 600/år
Rensning 1 gång/5 år		5 000:-	1 000/år

12. REFERENSER

AGA Gas AB. Vårt korrosiva vatten. Sundbyberg (1981).

Andersson, A-C. et al. Djupinfiltration. En metod att upprätthålla grundvattentrycket i slutna aquiferer. Utförande, drift och kontroll. Statens Råd för Byggnadsforskning, Rapport R166:1980. (1980).

Andersson, O. Borrning och dokumentation. Borrningsteknik jämte metodik för geologisk datainsamling under borrningens gång. Lunds Universitet, Dept. of Quaternary Geology, Thesis 8, Lund 1981.

Andersson, O. Förutsättningar för introduktion av geotermi i SV Skåne. NE-projekt 4560-231. VIAK AB, Malmö, April 1982.

Andersson, O. Metodik för insamlande av geologiska data vid undersökningsborrningar med rotationsborrmaskin. IX Nord. Geol. Vintermötet, Uleåborg 1974.

Andersson, O. och Gustafson, G. Värmelagring i djupa slutna grundvattenmagasin. Byggnadsforskningsrådet R101:1980.

Atlas Copco, ODEX-metoden. Jordborrning enligt excentermetoden. Atlas Copco MCT, trycksak nr 15490, Stockholm 1975.

Atlas Copco. Sänkborrning med COP sänkbormaskiner. Atlas Copco MCT, trycksak nr 15313 a, Stockholm 1976.

Bergman, M. Borrhålsundersökningar i berg. Tillförlitlighetsvärdering av metoder. Byggnadsforskningsrådet R17:1975.

Brons, F. and Marting, V.E. The Effect of Restricted Fluid Entry on Well Productivity. Jour. of Petr. Tech. (1961).

Campbell, M.D. and Lehr, J.H. Water Well Technology. McGraw - Hill Book Company, New York. (1973).

Campbell, M.D. and Lehr, J.H. Water well technology, McGraw - Hill, New York, 1974.

Church, M. Mud pressure aids cable tool drilling. Johnson Driller's Journal No. 3, 1960.

Cooper, H.H., Jacob, C.E. A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well-field history. Trans. Amer. Geoph. Un. Vol. 27, No. IV. (Aug. 1946).

Cunningham, R.A. Laboratory studies on the effect of rotary speed on rock-bit performance and drilling cost. Americ. Petrol. Inst., Drilling and Prod. Pract., 1960.

- Darcy, H. Les fontaines publiques de la ville de Dijon. Paris, Dalmont. (1856).
- Earlougher Jr, R.C. Advances in well test analysis. SPE monograph series. No. 5. Dallas. (1977).
- Eckel, J.R. and Rowley, D.S. How rotary speed affects penetration. Oil and Gas Journal, No. 47, Nov. 1957.
- Edwards, J.H. Engineering design of drilling operations. Americ. Petrol. Inst., Drilling and Prod. Pract., 1964.
- EPA: Manual of Water Well Construction Practices. EPA-570/9-75-001. Washington. (1975).
- Eriksson, E. The Yearly Circulation of Chloride and Sulphur in Nature. Meteorological, Geochemical and Pedological implications, Part II, Tellus XII. (1960).
- Eriksson, E. och Khunakasem, V. Grundvattnets kemi. Grundvatten. Norstedts, Stockholm. (1970).
- Fair, G.M. and Hatch, L.P. Fundamental factors governing the streamline flow of water through sand. Jour. Amer. Water Works Ass. Vol. 25. (1933).
- Ferris, J.G. et al. Theory of aquifer tests. US Geol. Surv. Water-Supply Pap. 1536-E. Washington. (1962).
- Gustafson, G. Studies of the hydrogeology of subaqueous eskers. Chalmers Tekn. Högsk. Geol. Inst. Publ. A26. (1978).
- Gustafson, G. och Andersson, O. Geotermi i SV Skåne. Uppborrning och provpumpning av Hällviksnäs - 1. NE-projekt 4560-062/063. VIAK AB, Malmö, Juni 1979.
- Hazen, A. Some physical properties of sands and gravels with special reference to their use in filtration. 24th Ann. Rep. Mass. State Bd. Health. Boston.
- Hantusch, M.S. Nonsteady flow to a well partially penetrating an infinite leaky aquifer. Proc. Iraqi Scientific Soc. Vol. 1. (1957).
- Howard, G.C. and Scott, P.P. An analysis and the control of lost circulation. Trans. SPE of AIME, Vol. 192, 1951.
- Huisman, L. Groundwater Recovery. Mac Millan, London, 1972.
- Johnson Division. Ground Water and Wells. Universal Oil Products Co. Saint Paul Minnesota 55165. (1972).
- Johnson Division. Groundwater and wells, Saint Paul, Minnesota, 1975.

- Kompendium i VA-teknik, Del I, Grundkurs. Chalmers Tekniska Högskola, Institutionen för VA-teknik. Göteborg. (Oktober 1980).
- Kozeny, J. Theorie und Berechnung der Brunnen. Wasserkraft und Wasserwirtschaft. Vol. 28, pp 101-105. (1953).
- Klotz, D. Hydraulische Eigenschaften der Schlitzbrückenfilter. BBR. Nr. 12. (1969).
- Klotz, D. Hydraulische Eigenschaften der Schlitzfilter (II). BBR. Nr. 11. (1970).
- Klotz, D. Hydraulische Eigenschaften der Johnsonfilterrohre. BBR. Nr. 4. (1971).
- Knudsen, H.A. Corrosion and Tuberculation. JAWWA 32, pp 387 (1940).
- Kungliga Medicinalstyrelsen. Bakteriologiska undersökningar. Meddelande nr 12. (1966).
- Kungliga Medicinalstyrelsen. Fysikalisk-kemiska vattenundersökningar. Meddelande nr 122. (1968).
- Langlier, W.F. The analytical control of anti-corrosion water treatment, JAWWA, 28 (1936).
- Linde-Jensen, J.J. et al. Vandforsyningsteknik. Teknisk Hygiene Polyteknisk Forlag. (1976).
- Malmbergs i Yngsjö AB, Borrning med polygripskopa, och rotationsborrning med omvänd spolning. Illustrationer utan årtal.
- Maslov, B.S. (1975) et al. Empfehlungen für die Prophylaxe des Schutzes verdeckter Dränagen. Hidrotehnika i Melioracija 8, 61-62 (1975).
- Modig, S. Dokumentation av vattentäkter. Sveriges Geologiska Undersökning. Rapporter och Meddelanden nr 10, 1978.
- Moore, W. How to dull a bit for fun and profit. Drilling, March, 1968.
- Moye, D.G. Dimond drilling for foundation exploration. Civil Engineering Trans., Vol 9, No. 1, 1967.
- Murray, A.S. and Eckel, J.E. Foam agents and foam drilling. Oil and Gas Journal, Febr., 1961.
- Müllern, C-F. Kapacitetsökning hos bergborrade brunnar genom högtrycksspolning. En replik. Vannet i Norden nr 1. (1978).
- Müllern, C-F., Eriksson, A. Kapacitetsökning hos bergborrade brunnar genom högtryckspumpning. Vannet i Norden nr 2. (1977).

Ryznar, J.W. A new Index for Determining Amount of Calcium Carbonate Scale Formed by a Water. Jour. of Amer. Water Works Ass. Vol. 36. (1944).

Sandvik Coromant, Atlas Copco, "ODEX", broschyr S11035, 1977.

SGF:s laboratoriekommitté. Laboratorieanvisningar. Kornfördelning. (1981).

Socialstyrelsen. Normer för dricksvatten. (1950).

Stumm, W. Investigation on the corrosive behavior of water. J. Sanit. Eng. Divis., SH6, ASCE (1960).

Thies, C.V. The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground water storage. Trans. Am. Geophys. Union. v. 16. (1935).

Thiem, A. Hydrologisch Methoden. Leipzig, Gebhart (1899).

Tröften, P.F. Groundwater utilization in hard rocks. Atlas Copco MCT, printed matter No. 15317 a, Stockholm 1973.

Young, F.S. Computerized drilling control. Trans. SPE of AIME, Vol. 246, 1969.

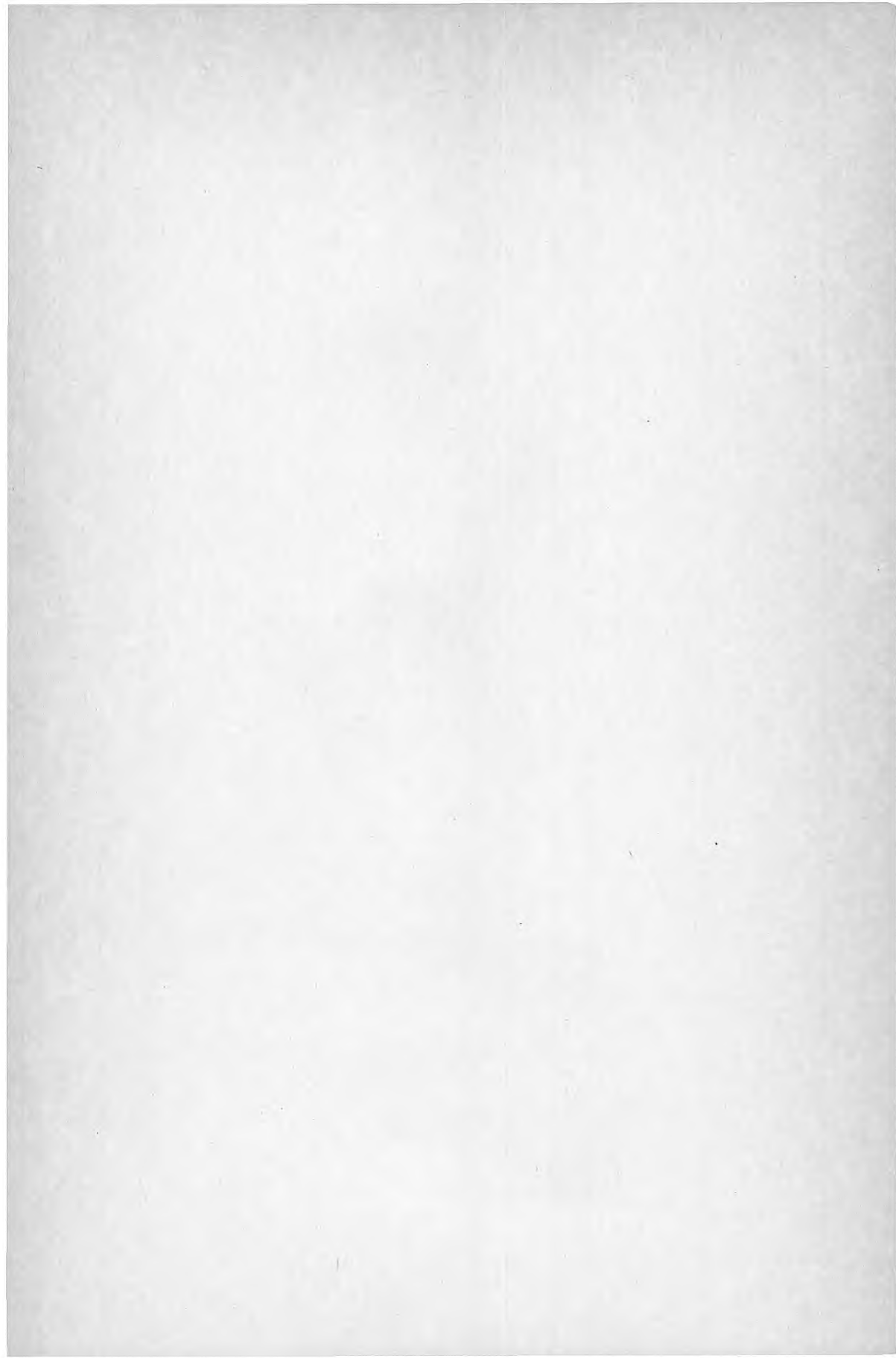
BEGREPPSLISTA

A (m^2)	Area
A_f (m^2)	Filtorrörets mantelyta
A_w (m^2)	Brunnsmagasin
b (m)	Formationsmäktighet
B	Jakobs faktor för laminära förluster
C	Integrationskonstant, Jakobs faktor för turbulenta förluster
C^1 (s^2/m^5)	Korrektionsfaktor för avtagande mäktighet hos akviferer
D (mm)	Ekvivalent korndiameter
D_{10} (mm)	Effektiv korndiameter, 10 percentil på sikt-kurva
D_{60} (mm)	60 percentil på sikt-kurva
D_f (mm)	Grusfiltrets korndiameter
Eh (V)	Redoxpotential
f	Perforation
g ($\frac{m}{s^2}$)	Tyngdkraftens acceleration $9.81 m/s^2$
H	Pumpens uppfodringshöjd
h (m)	Piezometrisk tryckhöjd
h_0 (m)	Piezometrisk tryckhöjd före pumpstart
ID (mm)	Filtorrörets innerdiameter
i (m/m)	Hydraulisk gradient
K (m/s)	Permeabilitet
l (m)	Filtorrörslängd för brunn
N	Brunnens igensättningstal
OD (mm)	Filtorrörets ytterdiameter
P (Pa)	Tryck
p	Penetration för ofullständig brunn
pH	Negativa 10-logaritmen av vattnets vätekoncentration
Q (m^3/s)	Vattenuttag ur brunn
Q/s_w ($m^3/s \cdot m$)	Specifik kapacitet
Q_{dim} (m^3/s)	Dimensionerande brunnuttag

Q_{\max} (m^3/s)	Största tillåtna brunnsuttag
R_0 (m)	Influensradie
Re	Reynolds tal
r (m)	Radie
r_e (m)	Skärningspunkten mellan avsänkningskurvan och nollavsänkningsaxeln i en avstånd-avsänkningsanalys
r_w (m)	Brunnsradie
r_{wf} (m)	Effektiv brunnradie
RSI	Ryznar stability index
S ($\text{m}^3/\text{m} \cdot \text{m}^2$)	Magasinskoefficient
S_a ($\text{m}^3/\text{m} \cdot \text{m}^2$)	Elastisk magasinskoefficient
s (m)	Avsänkning
s_{dim} (m)	Dimensionerande avsänkning
s_{max} (m)	Största tillåtna avsänkning
s_s (m)	Tilläggsavsänkning på grund av skineffekt
s_w (m)	Avsänkning i en uttagsbrunn
T (m^2/s)	Transmissivitet
T_0 (m^2/s)	Transmissivitet för öppet grundvattenmagasin
T_{80} (m^2/s)	Transmissivitet som med 80% sannolikhet överskrider bestämd från siktkurva
\bar{T} (m^2/s)	Sannolik transmissivitet bestämd från skikt-kurva
T_{sc} (m^2/s)	Transmissivitet hos den del av lagerföljden som täcks av brunnfiltret
t (mm)	Slitsöppning i filterrör
t (s, min)	Pumpningstid
t_0 (min)	Tidpunkt för skärning mellan avsänkningskurva och tidsaxeln i halvlogaritmisk avbildning
t_{of}	Teoretisk tidpunkt för skärning mellan avsänkningskurva och tidsaxeln i halvlogaritmisk avbildning
TDS (mg/l)	Total salthalt
U	Olikformighetstal
u	Hjälpparameter för brunnfunktionen
v (m/s)	Darcy's flödes hastighet
v_c (m/s)	Kritisk slitshastighet

v_f (m/s)	Bruttohastighet över filterrörets mantelyta
W (u)	Brunnsfunktionen
x (m)	Längdkoordinat
z (m)	Höjdkoordinat
γ (kg/m ² ·s ²)	Tunghet
γ	Dimensionslös brunnsmagasinsfaktor
Δs (m)	Avsänkning per tidsdekad i halvlogaritmisk avbildning
ξ	Skinfaktor
ξ_p	Pseudoskinfaktor
η	Brunns effektivitetstal, pumpens verkningsgrad
θ	Dimensionslös tid
\mathcal{H} (μS/cm)	Vattnets ledningsförmåga
λ	Brunns slankhetstal
μ (Pa·s)	Dynamisk viskositet
ρ	Dimensionslös radie, densitet (kg/m ³)
σ	Dimensionslös avsänkning







Denna rapport hänför sig till forskningsanslag
780436-5 från Statens råd för byggnadsforskning
till Chalmers Tekniska Högskola, VA-Teknik,
Göteborg.

R42: 1984

ISBN 91-540-4108-2

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

Art.nr: 6704042

Abonnemangsgrupp:
V. Anläggningsteknik

Distribution:
Svensk Byggtjänst, Box 7853
103 99 Stockholm

Cirkapris: 60 kr exkl moms