

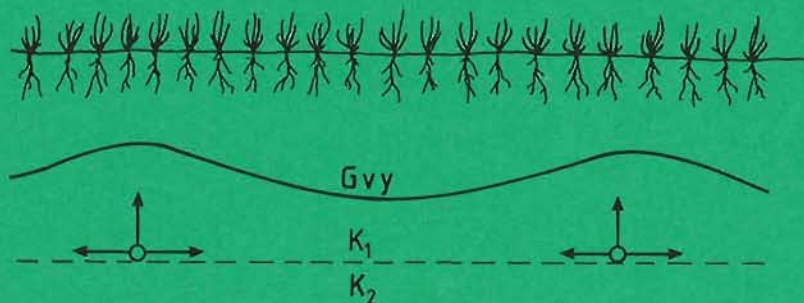


SVERIGES LANTBRUKSUNIVERSITET

ALTERNATIVA BEVATTNINGSFORMER 2. REGLERING AV GRUNDVATTENNIVÅN

Alternative irrigation
2. Subirrigation

Staffan Alinder



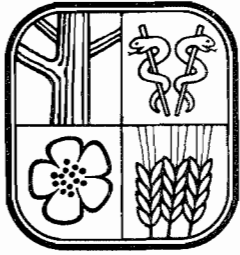
Institutionen för markvetenskap
Avdelningen för lantbrukets hydroteknik
Swedish University of Agricultural Sciences
Department of Soil Sciences
Division of Agricultural Hydrotechnics

Rapport 150
Report

Uppsala 1986

ISSN 0348-1816

ISBN 91-576-2788-6

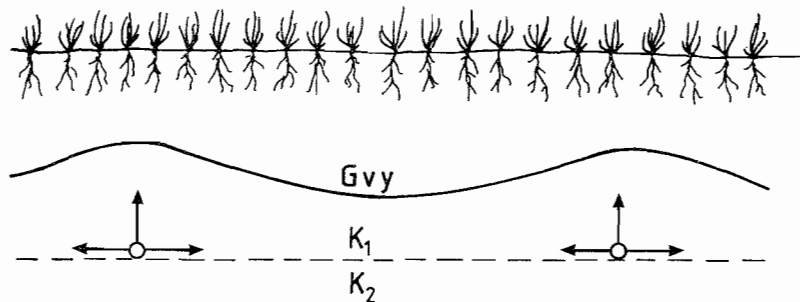


SVERIGES LANTBRUKSUNIVERSITET

ALTERNATIVA BEVATTNINGSFORMER 2. REGLERING AV GRUNDVATTENNIVÅN

Alternative irrigation
2. Subirrigation

Staffan Alinder



Institutionen för markvetenskap
Avdelningen för lantbrukets hydroteknik
Swedish University of Agricultural Sciences
Department of Soil Sciences
Division of Agricultural Hydrotechnics

Rapport 150
Report

Uppsala 1986
ISSN 0348-1816
ISBN 91-576-2788-6

FÖRORD

År 1979 startade Sölvesborgs kommun och VBB ett projekt för utnyttjande av avloppsvatten för bevattning. Målsättningen med projektet var dels att minska kommunens kostnader för avloppsrening och dels att tillgodose jordbrukets behov av bevattningsvatten i områden med vattenbrist. Lämplig teknik för bevattningen skulle utprovas och olika effekter av avloppsvattenbevattningen skulle belysas. Viktiga frågor som skulle utredas var miljöeffekter, hygieniska risker, energihushållning och ekonomi.

Till projektet knöts en referensgrupp med representanter för Jordbruksdepartementet, Länsstyrelsen i Blekinge län, Lantbruksstyrelsen, Socialstyrelsen, Statens Naturvårdsverk, Sveriges Geologiska Undersökning och Sveriges Lantbruksuniversitet. Referensgruppens uppgift var att medverka vid projektets uppläggning och vid kontrollprogrammets utformning, att bedöma behovet av nya undersökningar samt att göra en allmän utvärdering av projektet från samhällets synpunkt.

SLU fick i uppdrag att undersöka alternativa möjligheter att sprida bevattningsvattnet så att de hygieniska riskerna minimerades. Medel för undersökningen erhöles från Skogs- och Jordbrukets Forskningsråd, (anslag A5751/B4176). Denna rapport utgör tillsammans med rapport nr 141 i denna serie (Ahlinder, S., 1984, Alternativa bevattningsformer 1. Bevattningsramp) en redovisning av Lantbruksuniversitetets undersökningar.

Ansvarig för projektet har varit undertecknad. Agronom Staffan Ahlinder har svarat för huvuddelen av arbetet. Försöksledare Ragnar Persson har, sedan Ahlinder övergått till annan verksamhet, slutfört redovisningen av materialet. Försöksledare Anders Bjerketorp och professor Waldemar Johansson har granskat texten. Ingenjör Hans Johansson har renriat alla figurer.

Uppsala i september 1986

Harry Linner

Innehållsförteckning

1. Inledning	7
2. Underbevattningens principer och former	8
3. För- och nackdelar med underbevattning	9
4. Erforderliga naturliga förutsättningar	10
5. Bedömning av de naturliga förutsättningarna	11
5.1. Markens genomsläpplighet	11
5.2. Kapillär transportförmåga	13
5.3. Markens porvolym	14
5.4. Topografi	15
5.5. Ogenomsläppligt lager	15
5.6. Lagrade profiler	18
5.7. Vattenbehov	20
5.8. Vattenkvalité	20
6. Grundvattenståndets betydelse för rotmiljön	21
7. Planering av underbevattning	23
8. Ledningsavstånd vid underbevattning	26
8.1. Fox' formel för beräkning av ledningsavståndet vid konstant vattenavgång	27
8.2. Hallgren & Sandsborgs formel för beräkning av ledningsavståndet vid konstant vattenavgång	29
8.3. Edelmanns lösningsmetod för bestämning av grundvattenståndssändringar	30
8.3.1. Momentan förändring av vattenståndet i kanalen	32
8.3.2. Gradvis förändring av vattenståndet i kanalen	32
8.4. Skaggs' formel för lämpligt ledningsavstånd vid jämvikt mellan bevattning och evapotranspiration	33
8.5. Skaggs' lösning för grundvattenytans stighastighet	35
8.6. Sovjetiska formler för stigtid och ledningsavstånd under höjningsfasen	36
8.6.1. Ekvationer för isotrop jord	37
8.6.2. Jord med genomsläppligt ytlager	38
8.6.3. Jord med två lager med olika genomsläpplighet	39
8.6.4. Anisotrop jord	39
9. Rördimensionering	41
10. Filter	41
11. Dämningspunkter	42
11.1. Överfallsvärn	43
11.2. Dämningsbrunnar	43

12. Drift och övervakning av underbevattning	44
12.1. Konstant grundvattenstånd	45
12.2. Inom vissa gränser fluktuerande vattenstånd	46
12.3. Vikande grundvattenstånd	46
12.4. Höjning av grundvattenytan till marknivå och därefter dränering	47
13. Avloppsvatten till underbevattning	47
13.1. Smittspridning	47
13.2. Tekniska problem	48
13.3. Övriga miljöaspekter	50
14. Ekonomi	51
14.1. Investeringar	51
14.2. Årskostnad	52
14.3. Arbetsbehov	53
15. Sammanfattning	54
16. Summary	55
17. Litteraturförteckning	56

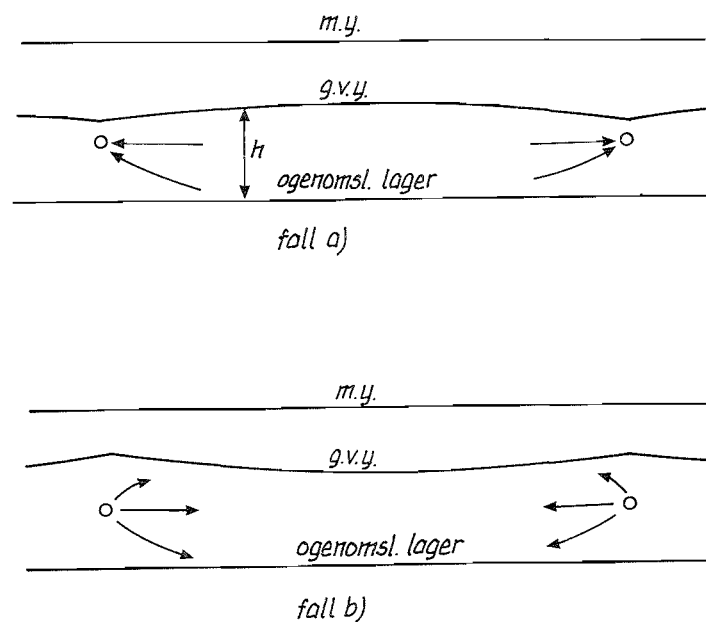
Bilagor

1. Använda beteckningar
2. Värderna för $f_0(u)$, $f_1(u)$ och $f_2(u)$ i den komplementära felfunktionen
3. Försök vid Stora Hästnäs

1. Inledning

Underbevattning är en bevattningsmetod som i vårt land rönt jämförelsevis liten uppmärksamhet. På andra håll i världen, t.ex. i USA och Nederländerna, har denna form av bevattning relativt stor omfattning. Även i Sverige torde underbevattning, åtminstone på en del platser, vara ett seriöst alternativ till de konventionella bevattningsmetoderna. Under gynnsamma betingelser blir investeringskostnaden för ett underbevattningssystem lägre än för ett konventionellt spridarbevattningssystem. Underbevattning kräver föga arbete under bevattningssäsongen. Metoden har också ansetts vara en från hygienisk synpunkt tillfredsställande metod för bevattning med biologiskt renat avloppsvatten. Användning av sådant vatten skulle öka tillgången på bevattningsvatten, samtidigt som växtnäringsämnen skulle utnyttjas på ett miljövänligt sätt.

Underbevattning är en komplex metod som här främst granskas med hänsyn till möjligheten att bevattna med avloppsvatten. Trots detta äger större delen av arbetet allmän giltighet för den typ av underbevattning som innebär att grundvattenståndet regleras.



Figur 1. Vattenrörelser vid: a) dränering
b) underbevattning
Water movement during: a) drainage
b) subirrigation

2. Underbevattningens principer och former

Underbevattning innebär att grödan förses med vatten underifrån istället för ovanifrån, som vid spridar- eller ytbevattning. Det finns flera sätt att underbevattna. Två huvudprinciper kan särskiljas. Den ena av dessa bygger på att vatten långsamt tillförs marken genom nedgrävda droppbevattningsledningar eller porösa rör. Grundvattenytan befinner sig då lägre än rörnivån.

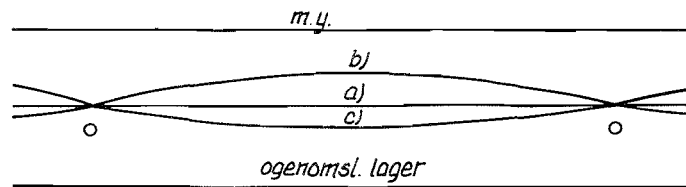
Den andra principen, vilken kommer att behandlas i detta arbete, innebär att en artificiell grundvattenyta upprätthålles genom att vatten tillförs marken via dräneringsledningar och/eller öppna diken. Grundvattenytan befinner sig då en stor del av tiden ovanför rörnivån. Ett namn på metoden är reglerat grundvattenstånd. En annan benämning är reversibel dränering, eftersom metoden syftar till att höja grundvattenståndet.

Principen för dränering visas i figur 1 a. Vid nederbörd infiltrerar vatten i marken. Därvid höjs grundvattenytan och vattenströmmen mot dräneringsledningarna ökar. Hastigheten varmed vattnet strömmar till ledningarna bestäms av grundvattenytans höjd över ett för vatten ogenomsläppligt lager (h i fig. 1), skillnaden i vattenstånd vid och mitt emellan rören, ledningsavstånd och markens genomsläpplighet.

Är grundvattenståndet oreglerat kommer grundvattnet på våren att strömma mot rören (fig. 1). Markens vatteninnehåll avtar och vattenytan ställer sig med tiden i nivå med rören. Under växtsäsongen sjunker den i allmänhet ytterligare. Då vattenståndet vid dräneringssystemets utlopp höjs med hjälp av en regleringsanordning är dränering fortfarande möjlig, men den begränsas jämfört med det ovan beskrivna fallet. Således magasineras mer vatten i markprofilen.

I figur 2 visas de principiellt möjliga fallen då dräneringssystemet regleras:

- a) Under förutsättning att inget vatten bortförs genom evapotranspiration (ET) eller läckage till omgivningen och att inget vatten tillförs genom nederbörd, ställer sig grundvattenytan horisontellt. Grundvattennivån blir densamma som vattennivån vid det dämnda utloppet
- b) Då vattenmängden som tillförs genom nederbörd är större än evapotranspirationen och läckaget, ställer sig grundvattnet över dämningnivån. Vatten strömmar till rören och vidare ut över utloppets dämningströskel
- c) Om vattenavgången är större än nederbörden, blir vattennivån mellan dräneringsledningarna lägre än vattennivån ovanför dessa. Vattennivån ovanför ledningarna kommer i sin tur att vara något lägre än i den dämnda kanalen. Marken tillförs då vatten från kanalen via dräneringssystemet. Detta tillstånd är det vanligast förekommande vid underbevattning på högsommaren.



Figur 2. Principiellt möjliga fall då grundvattennivån regleras:

- a) ingen bortförrel eller tillförrel av vatten
- b) nederbörden > evapotranspirationen
- c) evapotranspirationen > nederbörden

Possible conditions with a controlled and reversible drainage system:

- a) no removal or addition of water*
- b) precipitation > evapotranspiration*
- c) evapotranspiration > precipitation*

3. För- och nackdelar med underbevattning

Där underbevattning kan tillämpas erbjuder metoden flera fördelar jämfört med andra bevattningssystem:

- a) Om den för grödan lämpliga grundvattennivån kan hållas får grödan jämn och god tillgång till vatten under hela växtperioden
- b) Ingen risk för tillslamning av markytan föreligger
- c) Arbetsbehovet är i regel litet
- d) Energiförbrukningen är liten i förhållande till energiförbrukningen vid spridarbevattning
- e) Investeringskostnaderna för underbevattning är låga under förutsättning att ett befintligt dräneringssystem kan användas eller att området ändå ska täckdikas

Att underbevattning trots sina uppenbara fördelar inte vunnit någon större omfattning beror på att metoden också har en rad problem och begränsningar:

- a) Metoden förutsätter en kombination av naturförhållanden som ofta är svår att finna
- b) Vattenbehovet är större än vid spridarbevattning

- c) Eftersom grundvattenståndet påverkar rotdjupet, fordras planering av grödvalet med hänsyn till de olika växtslagens rotdjup på den aktuella jorden
- d) Då ett underbevattningsföretag i regel berör flera markägare, krävs samarbete mellan dessa vad gäller grödval, dämningnivåer, dämningstidpunkt etc.
- e) Metoden medför inom arida och semiarida områden stor risk för saltanrikning

4. Erforderliga naturliga förutsättningar

Det är nödvändigt att noga undersöka markprofil, hydrologi och topografi inom det område som eventuellt ska underbevattnas. Utifrån resultaten av dessa undersökningar avgörs sedan om jorden kan underbevattnas och hur detta i så fall bör ske.

De naturliga förutsättningar som krävs för att underbevattning ska vara möjlig är följande:

- a) Jorden måste vara homogen och ha hög genomsläpplighet. Det genomsläppliga lagret måste vara tillräckligt djupt
- b) Jorden bör ha hög kapillär transportförmåga
- c) Markytan måste vara jämn och horisontell eller endast slutta svagt
- d) Det måste finnas antingen ett ogenomsläppligt lager eller en naturlig, hög grundvattenyta som hindrar det artificiella grundvattnets rörelse nedåt
- e) Det ogenomsläppliga lagret bör vara jämnt och i stort sett parallellt med markytan
- f) Den bevattnade arealen bör vara stor för att minska betydelsen av läckaget till omgivningen
- g) God tillgång på vatten krävs
- h) Inom arida och semiarida områden måste både jorden som underbevattnas och vattnet som används vara i stort sett saltfria. Vattnet bör heller inte innehålla nämbara mängder suspenderat material

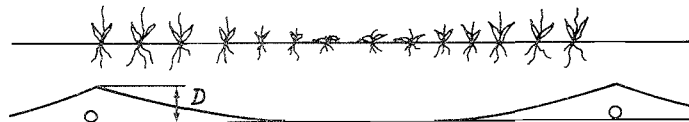
5. Bedömning av de naturliga förutsättningarna

5.1. Markens genomsläpplighet

För att underbevattning ska vara möjlig måste genomsläpplighetskoefficienten (k -värdet) vara stor. Heiwall (1980) nämner värdet 1 m/dygn som gräns, medan Nicolay (1980) sätter gränsen vid 0,5 m/dygn. I Holland underbevattnas en jord med det i sammanhanget anmärkningsvärt låga k -värdet 0,3 m/dygn (Kalisvaart, 1958).

Anledningen till att genomsläppligheten måste vara stor, är att man utan orealistiskt små ledningsavstånd ska kunna, dels höja grundvattenytan till önskad nivå på rimlig tid, dels hålla grundvattnets maximala depression mellan ledningarna vid cirka 0,1 m. Dessutom måste man snabbt kunna dränera profilen i händelse av kraftig nederbörd. Sommartid kan grödan skadas märkbart redan efter något dygns vattenmättnad av profilen (Williamson & Kriz, 1970).

Akvifärens (grundvattenmagasinets) djup (D i fig. 3) spelar också en stor roll i sammanhanget. Ju djupare akvifär, desto större kan ledningsavståndet vara utan att systemets funktion äventyras. Alternativt kan man acceptera ett lägre k -värde för en djup akvifär. En grund akvifär är också känsligare för störningar. Under extrema värmeböljor kan torka uppträda i band över fält med grunda akvifärer (fig. 3). En tumregel för akvifärens djup är att den inte bör vara mindre än 0,4 m (jfr Heiwall, 1980).



Figur 3. Vid grund akvifär och hög evapotranspiration kan torka uppträda i band över fältet.

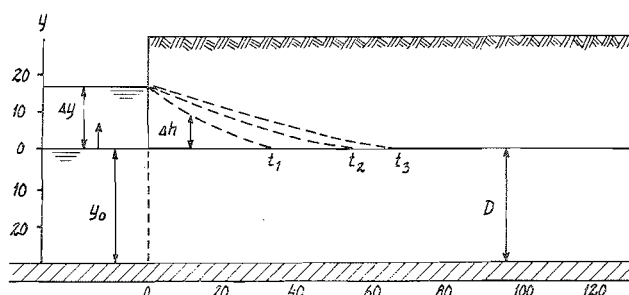
If the aquifere is shallow and the evapotranspiration high, the field may dry out in strips.

I vårt land kan två huvudtyper av jordar med tillräckligt stor genomsläpplighet urskiljas. Den ena är enkelkornjordar, exempelvis sand och grovmo med ringa halt av finare material. Den andra är grovsprickiga organogena jordar som bleke och gyttjeler. Även vanliga leror kan initialt ha tillräckligt hög genomsläpplighet, men den minskar kraftigt vid långvarig vattenmättnad.

Genomsläppligheten kan skattas om jordens kornstorleksfördelning och mullhalt är kända (Bloemen, 1980a; Hillel, 1980) men resultatet är mycket osäkert. Det är bättre att göra direkta

mätningar. På enkelkornjordar kan man ta ut provproppar och mäta genomsläpligheten på laboratorium. För övriga jordar rekommenderas någon fältmetod som t.ex. borrhålsmetoden, infiltrationsmetoden eller mätning av grundvattenytans rörelse som funktion av tiden och av vattenståndet i ett närliggande dike (fig. 4). Dessa mätningar bör göras på ett par platser inom det tilltänkta underbevattningsområdet.

På grovsprickiga jordar ger grundvattenståndsmätningar de säkraste resultaten, eftersom de hänför sig till en så stor jordvolym att man säkert får med effekten av de största sprickorna. Grundvattenståndsobservationer på extremt grovsprickig mark i Kvismardalen, Närke, har givit genomsläplighetsvärden på några hundra meter per dygn (värdena varierar beroende på vilken matematisk modell som används och vilka antaganden som görs).



Figur 4. k -värdet kan bestämmas genom mätning av grundvattenytans rörelse då kanalens vattenstånd ändras.

Hydraulic conductivity of the soil can be calculated from groundwater measurements as the waterlevel in the ditch changes.

Med borrhålsmetoden erhöles på samma plats k -värden mellan 2 och 9 m/dygn. Ytterligare en fördel med grundvattenståndsmätningar är att man vet hur grundvattnet har uppfört sig i en given situation. En nackdel med metoden är att mätningarna ofta måste pågå under flera dygn.

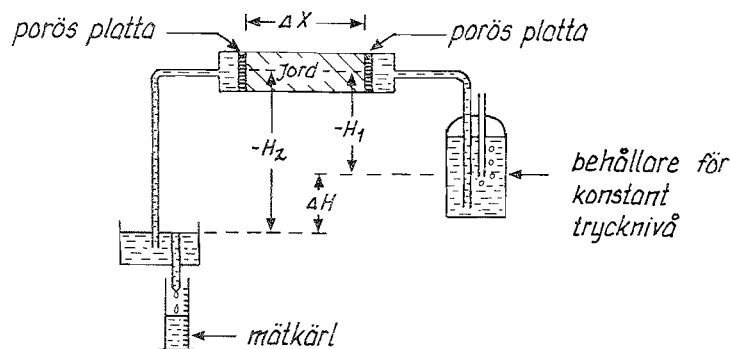
Även det genomsläppliga lagrets djup behöver fastställas. Hur detta görs, beror mycket på de lokala förhållandena. Om en mjuk, genomsläpplig jord, t. ex. uppsprucken bleke, underlagras av en hård och tät bottenmorän, är det enklast att använda en sond och känna efter på vilket djup moränen ligger. Är det genomsläppliga lagret i stället en friktionsjord, får man byta ut sonden mot ett borrhål, men för det mesta går det fortfarande bra att känna det ogenomsläppliga lagret, oberoende av om det är en tät bottenmorän eller en tät lera. På gyttjelera eller bleke med stor mäktighet, som är uppsprucken till någon meters djup och därunder tät, kan man borra eller gräva ner ett tätt rör. Då vattnet inte längre stiger i röret har man nått det ogenomsläppliga lagret. Ett lager av sist nämnda slag är vanligen nära nog horisontellt.

5.2. Kapillär transportförmåga

En gröda förbrukar ca 3 mm vatten en genomsnittlig sommar dag. Under en särskilt varm och solig dag kan förbrukningen öka till 6 mm. Jorden bör alltså kunna transportera 6 mm vatten per dygn från grundvattenytan och upp i rotzonen. Genom den större vattenförbrukningen kommer grundvattendeformationen mellan rören att öka under perioder med stor evapotranspiration (jfr fig. 3).

Är kornstorleksfördelning och mullhalt kända så kan de kapillära egenskaperna skattas (Bloemen, 1980b; Hillel, 1980). De beräknade värdena är dock osäkra (Hillel, 1980) och ger endast en fingervisning om huruvida underbevattning är möjlig och vilket grundvattenstånd som i så fall bör väljas.

Att mäta de kapillära egenskaperna är fullt möjligt (fig. 5) men ganska omständligt och ingår inte i de rutinmässiga jordundersökningar som avdelningen för hydroteknik utför. En tredje möjlighet att utröna om den kapillära transportkapaciteten är tillräcklig, är att utföra lysimeterförsök. Hallgren m.fl. (1965) beskriver ett 20-årigt lysimeterförsök med underbevattning av blekejord på Gotland. För att få jord i ostörd lagring grävdes 900 mm betongrör ner i vertikalt läge genom att jorden utanför rören togs bort. Därefter sköts järnplåtar in under rören och gjöts fast. På denna jord, där rötterna kan nå relativt djupt, varierade den optimala grundvattennivån kraftigt med såväl gröda som årsmån.



Figur 5. Principen för mätning av kapillär transportförmåga (Hillel, 1980).

The principle for measuring unsaturated conductivity (Hillel, 1980)

Heiwall (1980) beskriver ett försök där grovmojord från St. Hästnäs på Gotland packades i lysimetrar (stora kärl) vilka sedan underbevattades. På denna jord är rotutvecklingen begränsad till matjorden, vilket torde medföra att det optimala grundvattenståndet är oberoende av gröda. Med utgångspunkt från försöksresultatet rekommenderades att grundvattnet skulle hållas på 0,4 m djup i profilen. Under 1982 och 1983 har denna jord underbevattats i praktisk drift, varvid brukaren har eftersträvat att hålla vattnet 0,5 m under markytan. Eftersom fälten är något kuperade innebär detta att vattenståndet har

varierat åtminstone mellan 0,4 och 0,7 m djup inom fälten. Trots detta har skörden varit god. Diskrepansen mellan den fingervisning lysimeterförsöket ger och det praktiska resultatet beror förmodligen på att lysimeterförsöken utfördes med omlagrad jord.

På jordar där rotdjupet är relativt stort finns möjlighet att underbevattna även om den kapillära transporten är ringa. I så fall höjer man grundvattenståndet i början av växtsäsongen och låter sedan rötterna följa efter den vikande grundvattenytan. Detta förfarande är dock mindre lämpligt för fleråriga grödor.

5.3 Markens porvolym

Magasineringsförmågan, dvs. den vattenvolym som är möjlig att lagra i jorden, är beroende av porositeten och jordlagrets djup. Magasineringskoefficienten (μ), även kallad effektiva porositeten, har stor betydelse för vattenbehovet vid akvifersens fyllande, men saknar betydelse för underbevattningens funktion som sådan. Den effektiva porositeten definieras som:

$$\mu = \frac{\Delta w}{\Delta h} \quad (1)$$

Δw = ändring i jordens vatteninnehåll (m)

Δh = ändring i grundvattenstånd (m)

Ekvation (1) gäller bara då jordens vatteninnehåll, w , inte påverkas av nederbörd, evapotranspiration e. dyl.

En jords effektiva porositet är inte konstant, utan varierar med grundvattenstånd, vatteninnehåll samt riktning och hastighet hos grundvattenståndsändringen. Den är starkt beroende av jordarten

Effektiva porositeten i samband med dränering kan vanligen räknas fram med hjälp av avsugningskurvor. I tabell 1 ges några riktvärden för den effektiva porositeten.

Tabell 1. Effektiva porositeten hos olika jordarter enl. Johnson (1966).

Jordart	variation (%)	medeltal (%)
lera	0- 5	2
mjåla (silt)	3-19	8
sandig lera	3-12	7
grovmö	10-32	21
sand	15-32	26
grov sand	20-35	27

Den effektiva porositeten ingår i flera av de formler som används vid dimensionering av underbevattningssystem.

5.4. Topografi

Ett område som ska underbevattnas bör vara plant och ha ingen eller endast ringa lutning. Högst 0,5 % är ett lämpligt riktvärde (Massey m.fl., 1983). Rent teoretiskt är det möjligt att underbevattna även kraftigt sluttande fält, men då krävs ett mycket stort antal dämningpunkter, som var och en kostar några hundra kronor, som kräver tillsyn och som (ofta) utgör brukningshinder.

Hur stora lokala höjdskillnader som kan accepteras beror dels på markens egenskaper (jfr 5.2.), dels på grödan. Småkuperade områden är i princip mindre lämpliga för underbevattning.

5.5. Ogenomsläppligt lager

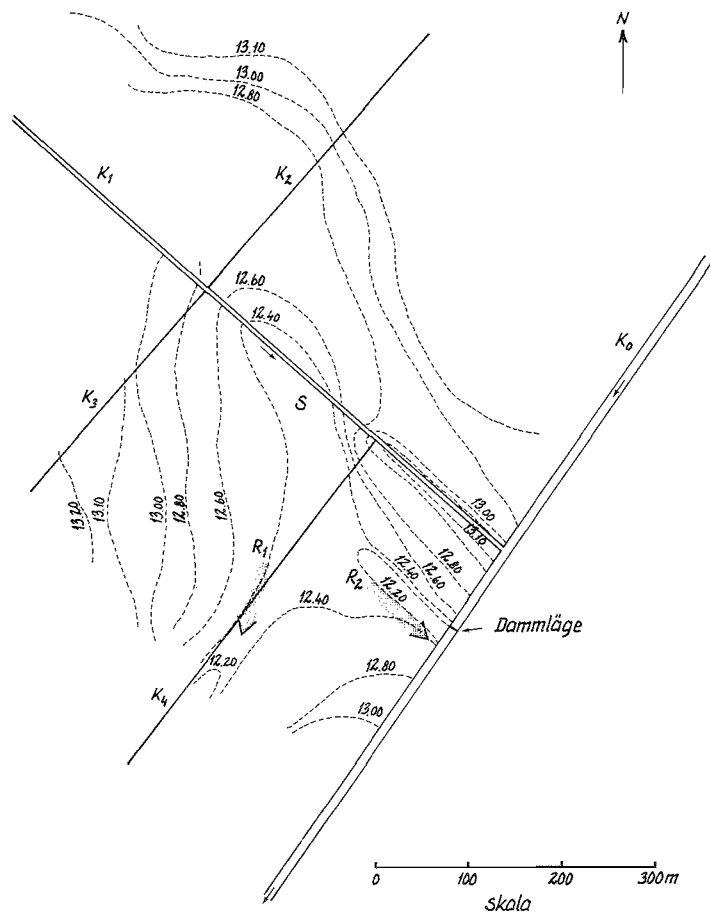
För att man över huvud taget ska kunna skapa en artificiell grundvattenyta måste vattnets rörelse ner mot djupare lager hindras, eller i varje fall kraftigt bromsas. Spärren kan antingen utgöras av en högt belägen naturlig grundvattenyta eller ett tätt skikt (t.ex. lera, morän, berg).

Redan en ringa genomsläpplighet i spärrskiktet kan resultera i vattenförluster av samma storleksordning som växternas vattenförbrukning. I extrema fall kan läckaget vida överstiga evapotranspirationen. Så är enligt Clinton (1948) fallet på Egin Bench, Idaho, där 11.300 ha sandjord som ligger på relativt genomsläpplig lava underbevattnas. Totala vattenförbrukningen ligger kring 4.500 mm per år, varav 11 % förbrukas av grödorna. Som ett kuriosum kan nämnas att 12.000 ha i ett lägre liggande område ytbevattnas med hjälp av läckvattnet från Egin Bench.

Ytterligare några faktorer som påverkar läckförlusterna ska behandlas här. Den första är djupet till ogenomsläppligt lager. Det sker alltid en viss horisontell strömning till omgivningen då man underbevattnar. Utströmningen är en funktion av djupet till tät horisont, k-värdet, det underbevattnade områdets omkrets och gradienten. Å andra sidan bör det ogenomsläppliga lagret inte ligga allt för grunt (se 5.1.).

Den andra faktorn är det tätas lagrets topografi. Bäst är om den tätas horisonten är vågrät (eller ännu hellre skålformad), men en ringa lutning kan också accepteras.

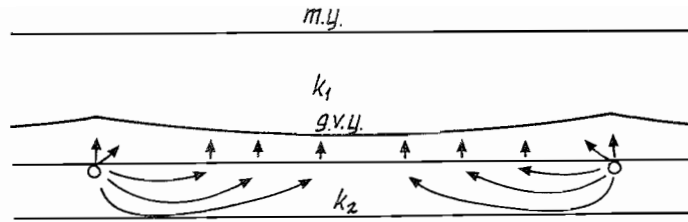
Om det är en tät morän som fungerar som spärr nedåt, är denna ofta ganska kuperad. Detta är inte nödvändigtvis ett hinder för underbevattning, men dels blir det svårare att optimera ledningssystemet, dels krävs en ordentlig undersökning av moränens topografi. Underlåtenhet att göra denna undersökning kan bl.a. resultera i olämplig placering av dämningpunkter,



Figur 6. Moränytan inom ett försöksområde på Mästermyr. R_1 och R_2 betecknar de svackor i moränytan genom vilka det huvudsakliga vattenläckaget från området antas äga rum. Notera fördämningens placering uppströms R_2 . Markytan ligger huvudsakligen mellan nivåerna 13,80 och 14,00 inom området. Från Segerros (1983).

Morain altitude in a research area on Mästermyr, Gotland. R_1 and R_2 are depressions through which most leakage from the area occurs. Note the dam just upstream R_2 . Most of the area is between 13.8 and 14.0 m above sea level. From Segerros (1983).

något som kan få stor betydelse för bevattningseffekt och vattenförluster. Segerros (1983) beskriver ett fall på Mästermyr, Gotland, där en fördämning placerats strax uppströms en svacka i bottenmoränen (fig. 6) med åtföljande negativa effekter på bevattningsresultatet.

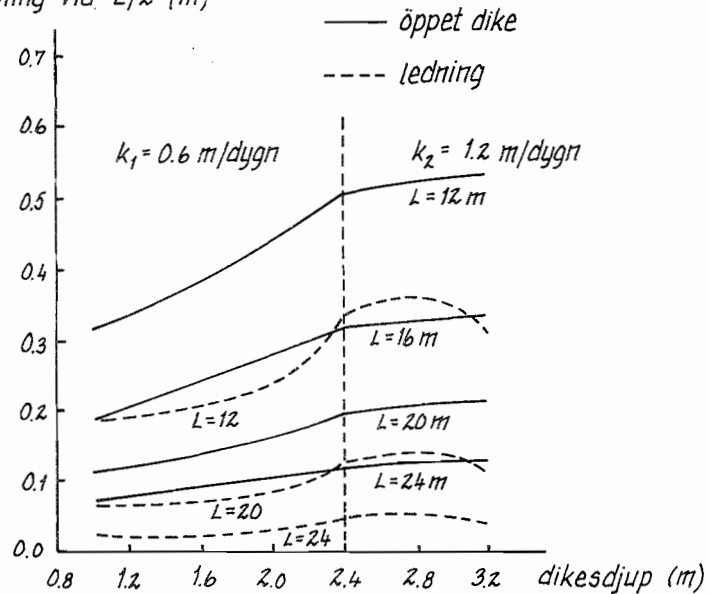


Figur 7. Grundvattenströmningen vid underbevattning då det genomsläppliga lagret överlagras av en jord med liten genomsläpplighet.

Waterflow during subirrigation when the surface layer has considerably lower hydraulic conductivity than the lower layer.

grundvattenstånds-

höjning vid $L/2$ (m)



Figur 8. Ett dygns höjning av grundvattenytan mitt emellan dikena såsom funktion av dräneringsdjup och dikesavstånd. Ett ogenomsläppligt lager antas ligga på djupet 3,2 m (Tang & Skaggs, 1980).

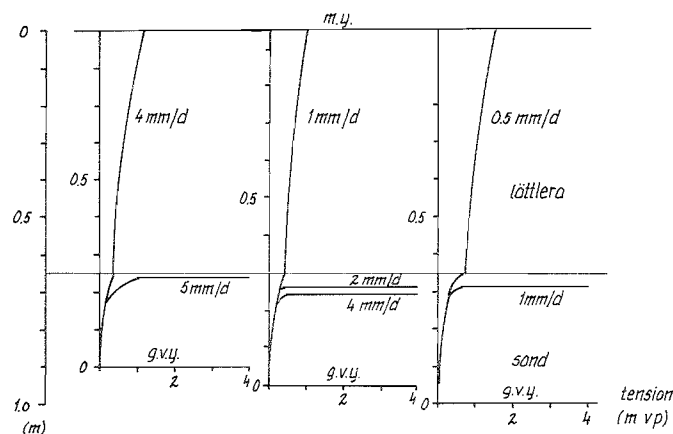
Midpoint water table rise after 24 h as function of drain depth and spacing (öppet dike = open ditch, ledning = covered drains). The soil is impermeous below 3.2 m. (Tang & Skaggs, 1980).

Några olika sätt att kartlägga det ogenomsläppliga lagret har beskrivits under 5.1. Observera också att ett högt naturligt grundvattenstånd främst har betydelse för hur stor vattenvolym som krävs då grundvattnet ska höjas till önskad nivå, medan djupet till tät botten fortfarande blir avgörande för lämpligt ledningsavstånd och möjligt läckage till omgivningen. Det naturliga grundvattnet bör kartläggas både i tid och rum.

5.6. Lagrade profiler

Hittills har endast talats om "det genomsläppliga" och "det ogenomsläppliga" lagret, men naturligtvis kan det finnas flera lager med varierande genomsläpplighet i en profil som ska underbevattas. Viktigt är att både det genomsläppliga och det ogenomsläppliga skiktet ligger inom rimligt avstånd från markytan och att vattentransporten till rotzonen är tillräckligt snabb. I figur 7 visas strömbilden vid underbevattning för en profil där en relativt svår genomsläpplig jord med hög kapillär transportförmåga underlagras av en jord med stort k -värde. Observera att dräneringsledningarna ligger i det genomsläppliga lagret.

I figur 8 visas grundvattenståndets höjning mitt emellan ledningarna såsom funktion av ledningsdjup och ledningsavstånd i en lagrad profil. Notera att huvuddelen av det ökade ledningsdjupets effekt har uppnåtts när man är nere vid det genomsläppliga lagret på djupet 2,4 m, och att betydelsen av att nå det genomsläppliga lagret är större ju mindre ledningsavståndet är. I figuren är också inlagt kurvor för ett öppet dike. Att använda öppna diken för underbevattning är endast aktuellt på jordar med mycket hög genomsläpplighet. Anledningen till att öppna diken trots detta tas med i resonemangen här, är att



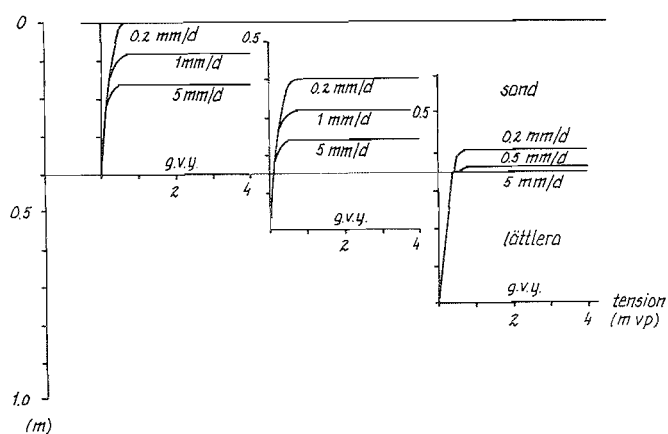
Figur 9. Kapillär transportförmåga vid olika grundvattenstånd i en profil där sand överlagras av 0,65 m lättilera.
Capillary transport at different groundwater levels in a profile of sand under 0.65 m light sandy clay.

de flesta författare antingen inskränker sitt teoretiska resonemang till öppna diken som når det ogenomsläppliga lagret, eller tar detta fall som utgångspunkt för ett resonemang som även kommer att omfatta underbevattning via dräneringsledningar. Det kan då vara intressant att se skillnaden mellan dessa båda fall.

Vid lagrade profiler är det ofta av större betydelse hur grundvattnet står i förhållande till de olika lagren, än hur stort det direkta avståndet grundvattenyta - markyta är. Om ett finare material med hög kapillär transportförmåga (t.ex. finmo) underlagras av ett grovt material med hög genomsläpplighet är profilen mycket lämplig för underbevattning. Ligger däremot grundvattenytan nere i det grova materialet, kan några centimeters variation i grundvattenståndet få närmast katastrofala följder för grödans vattenförsörjning (fig. 9).

Är det översta lagret t.ex. sand måste grundvattnet hållas relativt nära markytan. Från kapillär synpunkt kommer profilen att fungera som en homogen sandprofil. Det kommer inte att bli några drastiska skillnader i vattentillgång p.g.a. små svängningar i grundvattenstånd, utan den möjliga vattentillförseln kommer i princip att vara så som figur 10 visar. I de båda första fallen uppfylls, med god marginal, kraven på kapillär transportförmåga (3 mm/dygn) till rotzonen för en "normal" sommarkag.

På platser där översta lagret utgörs av mulljord har man ofta problem med det s.k. bevättningsmotståndet. Detta innebär att när jordytan är torr kommer vatten som tillförs uppfifrån att på markytan söka sig fram till sprickor och i dessa snabb rinna igenom rotzonen. Om en sådan jord underbevattas kan man förvänta mycket gott resultat av bevattningen. Samtidigt kommer den s.k. bortodlingen att minska (Stephens, 1955).



Figur 10. Kapillär transportförmåga vid olika grundvattenstånd i en profil där lättilera överlagras av 0,40 m sand.
Capillary transport at different groundwater levels in a profile of light sandy clay under 0.40 m sand.

5.7. Vattenbehov

Trots att avdunstningsförlusterna är mycket små vid underbevattning, kräver denna mer vatten än de flesta andra bevattningsmetoder. En del av detta vatten förbrukas inte genom evapotranspiration, utan kan i allmänhet återvinnas i form av dräneringsvatten vid odlingssäsongens slut. Även den direkta förbrukningen blir dock stor. Hur stor beror i hög grad på läckförlusterna (jfr vad som sagts om Egin Bench under 5.5.).

Enligt amerikanska undersökningar (Massey m.fl., 1983) kräver underbevattning ca 200 mm mer vatten än spridarbevattning. I den angivna mängden ingår, förutom horisontellt och vertikalt läckage, också den nederbörd som genom det höga grundvattenståndet inte kan tas upp av marken utan rinner av. Om nederbörden antas vara noll under vegetationsperioden, minskar skillnaden i vattenbehov till mellan 40 och 80 mm under de markförhållanden som antagits vid beräkningarna.

Av det nu sagda framgår att det krävs god tillgång på vatten om man ska underbevattna. Ett sätt att klara vattenanskaffningen kan vara att anlägga ett vattenmagasin och i detta lagra höstens och vårens dräneringsvatten. I annat fall får man förlita sig till "naturliga" vattentillgångar.

Underbevattning med biologiskt renat avloppsvatten har föreslagits som ett sätt att utnyttja avloppsvattnet som en resurs. Som framgår av avsnitt 13 är det emellertid inte självklart att ett sådant utnyttjande av avloppsvatten är lämpligt.

5.8. Vattenkvalité

I vårt land har vi inga större problem med kvalitén på bevattningsvattnet. Vid underbevattning är kvalitetskraven ungefär de samma som vid spridarbevattning. Vattnet bör dock inte innehålla stora mängder suspenderat material eller ha hög salthalt. Suspenderat material kan eventuellt minska genomsläpligheten i dräneringsfiltret och i jorden närmast ledningen, vilket kan få svåra följder för systemets funktion. Att använda östersjövatten till underbevattning är också mindre lämpligt. Eftersom vattnet rör sig uppåt och vattenhalten i rotzonen är måttlig kan saltkoncentrationen bli så hög att även salttåliga grödor tar skada. Dessutom låser man grödvalet till salttoleranta grödor över hela det område som underbevattnas.

Inom områden där nederbörden inte är tillräcklig för att åtminstone en gång per år laka ur profilen, är kravet på låg salthalt särskilt oeftergivligt. Eftersom vattenrörelsen i huvudsak sker uppåt, kommer eventuellt salt också att röra sig i denna riktning och anrikas i ytskiktet. Redan små saltkoncentrationer i bevattningsvattnet ger relativt snart skadliga salthalter i rotzonen, i synnerhet som evapotranspirationen brukar vara stor inom ifrågavarande områden. Enligt Rawitz & Heller (1969) har saltproblemet gjort att bl.a. 65.000 ha i Sacramentodalen, Kalifornien, vilka tidigare underbevattnades, numera bevattnas med spridare.

6. Grundvattenståndets betydelse för rotmiljön

Den för växterna gynnsammaste grundvattennivån bestäms av djupet och fördelningen av växtrötterna samt av jordens kapillära egenskaper. Växtrötternas fördelning i jorden är i sin tur beroende av en rad faktorer. Bland dessa kan nämnas den aktuella grödans egenskaper, grödans utvecklingsstadium, växtnäringens fördelning i profilen, aktuell jordbearbetning, fysikaliska och kemiska spärrar (såsom skenhålla resp. lågt pH) samt grundvattenståndet.

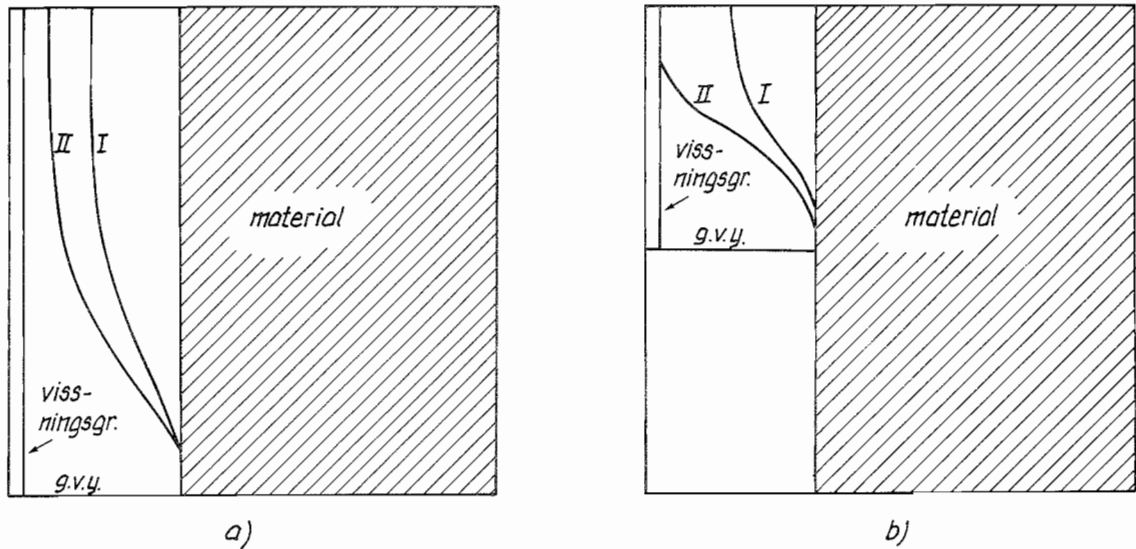
Rottillväxten på aggregerade jordar med slutet spricksystem, aggregerade jordar med öppet spricksystem och enkelkornjordar har studerats av Wiklert (1960). Av detta arbete framgår att det är svårt att säga något entydigt om rotdjupet på olika jordar, och därmed också svårt att ge några rekommendationer för lämpligt grundvattenstånd med utgångspunkt från enskilda grödors rotdjup.

I normala fall befinner sig den största rotvolymen i matjordslagret, men även djupare rötter har mycket stor betydelse för växternas vattenupptagning. På enkelkornjordar som sand och grovmo sammanfaller ofta rotdjupet med plöjningsdjupet, men på aggregerade jordar beror rotdjupet på den aktuella strukturen och slag av gröda. Grödor som t.ex. sockerbeter, höstsådd stråsäd och oljeväxter kan nå 2 m djup på aggregerade jordar, medan en grunt rotad gröda som potatis bara når ca 0,5 m djup. Förutom grödans rotdjup måste också markens kapillära egenskaper och markytans topografi vägas in då lämplig grundvattennivå ska fastställas.

En av de avgörande faktorerna för rottillväxten är fördelningen mellan markluft och markvatten. Marken bör innehålla ca 10 volymprocent luft. Det är mycket viktigt att undvika vattenmättnad i rotzonen vid underbevattning.

Det finns en principiell skillnad mellan vattenförhållandena i rotzonen vid underbevattning respektive vid yt- och spridarbevattning. Då bevattning sker ovanifrån befinner sig marken vid, eller nära, fältkapaciteten 1-2 dygn efter bevattningen (fig. 11a). Vattenhalten får sedan sjunka till halva fältkapaciteten, eller något lägre, före nästa vattengiva. För jorden i figur 11a, som är en homogen sandjord med 35 % porvolym, innebär det att vattenhalten kommer att variera från 17 % ner till 8 % mellan bevattningarna. Lufttillgången kommer således att vara god hela tiden.

Om samma jord, i vilken den maximala kapillära stighöjden antas vara 0,4 m, underbevattnas kommer vattenhalten ovanför grundvattenytan att ligga mellan kurvorna I och II i figur 11b. Kurva II visar vattenhaltsfördelningen i en från början torr jord, där vattnet får stiga från en grundvattenyta på 0,5 m djup. Detta är i stort sett det normala tillståndet vid underbevattning. Kurva I visar det största möjliga vatteninnehållet i jorden då grundvattnet befinner sig 0,5 m under mark-



Figur 11. Vattenhaltsfördelning i sandjord vid olika bevattningsförfaranden.

- a) Spridarbevattning
 I 1-2 dygn efter bevattning
 II omedelbart före bevattning

- b) Underbevattning
 I 1-2 dygn efter regn
 II normal fördelning vid bevattning

Soil moisture distribution in sand with different irrigation methods.

- a) *Sprinkler irrigation*
 I 1-2 days after irrigation
 II immediately before irrigation

- b) *Subirrigation*
 I 1-2 days after precipitation
 II normal state during irrigation

ytan. Denna situation kan uppstå om magasinet mellan I och II fyllts på genom nederbörd, eller om grundvattenytan höjts till 0,2 m (eller mindre) under markytan och sedan sänkts igen. Genom evapotranspirationen kommer dock vattenhalten relativt snart att sjunka till kurva II.

På de flesta platser där underbevattning är möjlig, är det relativt enkelt att hålla ett grundvattenstånd som ger grödan tillräckligt med både vatten och luft i rotzonen. Om rotzonen innehåller större mängder finmo eller mjåla kan dock andelen markluft lätt bli för liten. I jordar av denna typ bör grundvattnet hållas på någon meters djup (eller mer) för att tillräcklig genomluftning ska erhållas. Har grödan ett rotdjup som är nämnvärt större än plöjningsdjupet kan den i viss mån själv styra tillgången på vatten och luft genom rottillväxten.

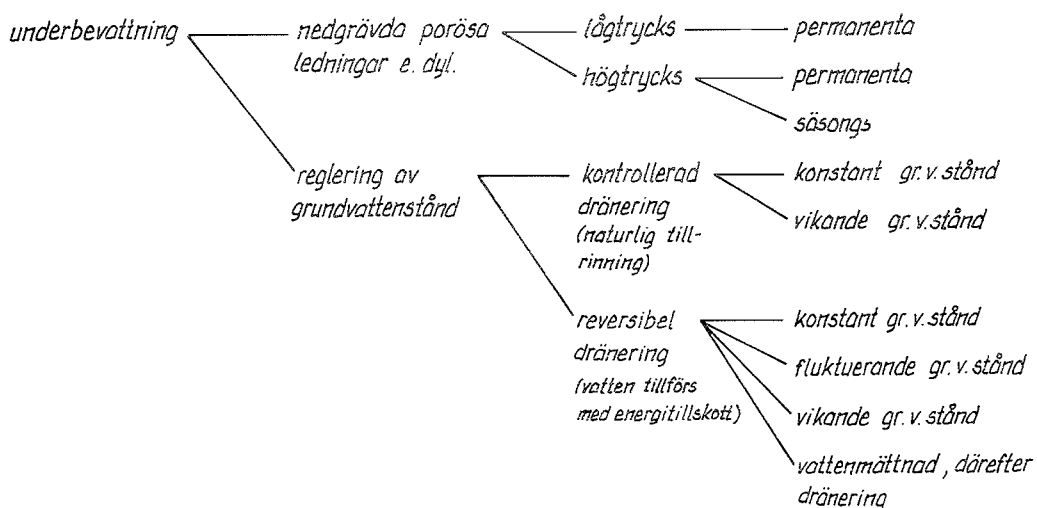
7. Planering av underbevattning

Ett underbevattningssystem kan utformas och drivas på flera olika sätt. En översikt av olika metoder visas i figur 12. Av de redovisade metoderna är olika former för grundvattenreglering vanligast. De är också de enda som är realistiska vid normal jordbruksdrift.

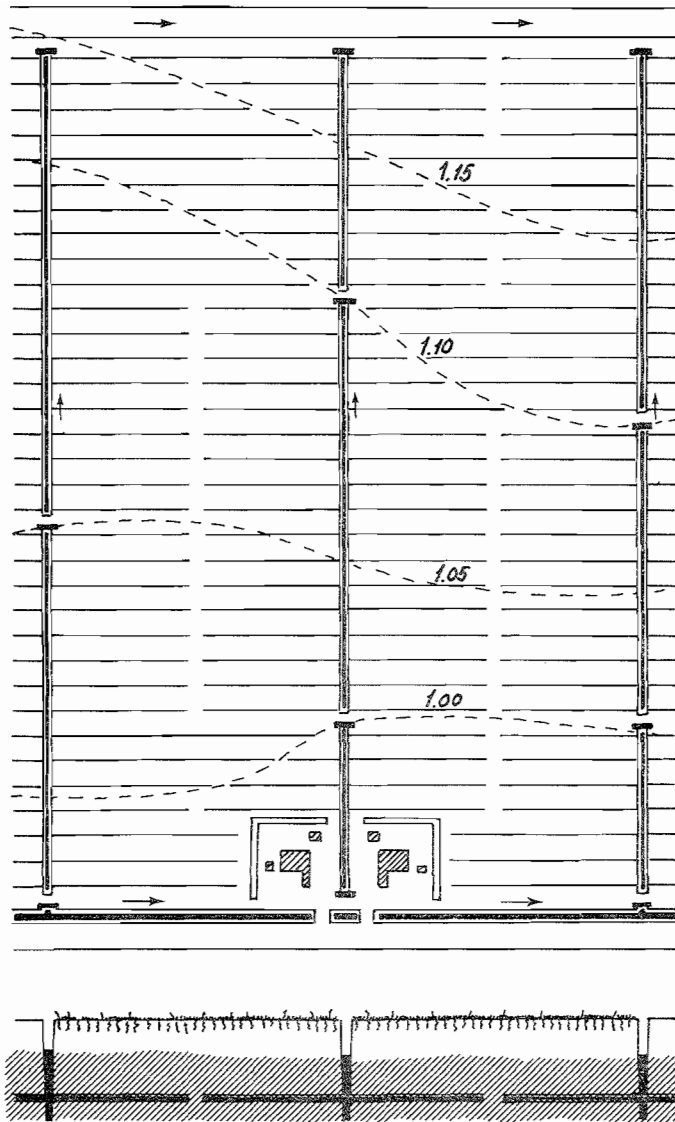
Den viktigaste faktorn vid projektering av ett system för underbevattning är valet av dikesavstånd och dikesdjup. Dikesavståndet bestäms av markens genomsläplighet, akvifärens djup och största acceptabla depression i grundvattenstånd mellan ledningarna. Dikesdjupet väljs så att tillräcklig dränering kan erhållas och, om möjligt, så att ledningarna ligger i det genomsläppliga lagret.

Det för underbevattning erforderliga tillflödet är mycket litet. Ledningar och öppna diken dimensioneras i stället för de flöden som krävs för att man snabbt ska kunna höja eller sänka vattenståndet.


Underbevattning kan utformas som ett kombinerat system för bevattning och dränering, eller med de båda funktionerna i större eller mindre utsträckning separerade. Ett exempel på den förstnämnda typen visas i figur 13 (Kalisvaart, 1958). Dikena utnyttjas både för tillförsel och bortförsl av vatten, samt för att kontrollera vattennivån. För det senare ändamålet placeras reglerbara överfallsvärn i de öppna diken. Värnen lägges vanligen ut för varje 0,1 m fall hos markytan. Detta, tillsammans med depressionen i grundvattenstånd mellan ledningarna, innebär att grundvattenståndet inom ett delsystem kommer att variera med mer än $\pm 0,05$ m från den önskade nivån.




Figur 12. Förekommande former av underbevattning.





 huvudtilllopp


 tilloppsdike eller kombinerat
 till- och avloppsdike med
 dämpunkt


 avloppsdike

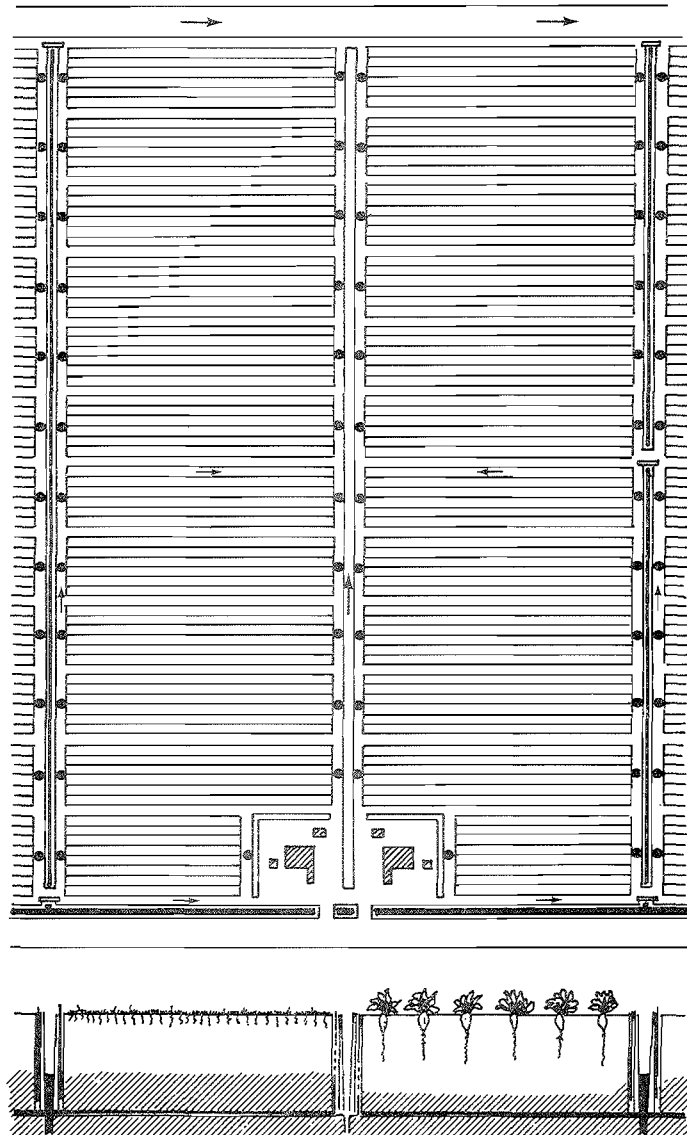

 huvudavlopp


 dämpningsbrunnar
 (in - resp. utlopp)

nivå-siffrorna anger höjdläget
 under havsytan

Figur 13. Underbevattningsystem med kombinerade till- och frånloppsdiken på sandjord ($k=3$ m/dygn) i Zuiderzeepoldern i Holland (Kalisvaart, 1958). *Subirrigation system with combined inlet and outlet ditches in the Zuiderzee Polders, the Netherlands. Hydraulic conductivity of the soil = 0.12 m/h (Kalisvaart, 1958).*

Ett system där tillförsel av bevattningsvatten och bortförsl av dräneringsvatten sker med skilda diken visas i figur 14 (Kalisvaart, 1958). Rörledningarna är kombinerade i block om maximalt 3 ha. Ledningarna inom varje block har gemensamt utfall i både tillopps- och frånloppsdikena. Reglerbara överfallsvärn finns i båda ändar av blocken, vilket gör det möjligt att ställa in önskat vattenstånd i varje enskilt block.



Figur 14. Underbevattningssystem med separata till- och frånloppsdi- ken och långt gående uppdelning av fälten i delsystem ($k=0,3$ m/dygn) (Kalisvaart, 1958).

Subirrigation system with separate inlet and outlet ditches and subdivision of the fields into plots of approximately 3 ha. Hydraulic conductivity = 0.013 m/h (Kalisvaart, 1958).

En jämförelse mellan de båda systemen visar att fördelen med det system där bevattning och dränering är sammanbyggda i första hand är dess enkelhet. Vattenstånden regleras med ett antal överfallsvärn i ett öppet dike, varigenom det blir lättare att övervaka systemets funktion än vid blockmetoden där värnen sitter gömda i brunnar längs dikena. En annan fördel med den kombinerade varianten är att strömningsvägen blir kortare och flödet i rören mindre än i blockmetoden vid i övrigt

lika förutsättning. Detta resulterar antingen i mindre grundvattenståndsvariation i rörens längdriktning, eller i att man kan använda klenare rör. Den sista stora fördelen med det kombinerade systemet, är att underhållet blir mycket enklare genom att rören är utdragna till det öppna diket och därigenom lätta att rensa.

Blocksystemets stora fördel ligger i dess flexibilitet. Inom varje block kan det för tillfället lämpligaste vattenståndet ställas in, oberoende av vilka vattennivåer som råder i de intilliggande blocken. Detta innebär att djuprotade grödor (t.ex. lusernvall) kan odlas intill grödor med litet rottdjup (t.ex. hallon), även om man får räkna med kanteffekter om skillnaden i rottdjup är stort. I det kombinerade systemet begränsas det möjliga vattenståndet i varje parcell till att ligga mellan det vattenstånd som råder i parcellen uppströms och det som råder i parcellen nedströms.

De båda ovan beskrivna systemen är framtagna för jungfrulig mark i en holländsk polder, och kan vanligtvis inte flyttas över till svenska förhållanden utan modifieringar. Vi får i stället försöka anpassa de olika systemen till den ägofördelning som råder och de dräneringssystem som eventuellt finns. I något enstaka fall räcker det att göra en fördämning i avloppet på ett befintligt dräneringssystem och sedan tillföra vatten för att man ska få en fungerande underbevattning (Traktorjournalen, 1974).

I allmänhet krävs dock kompletteringar, främst med dämmningspunkter men ibland också med tätare ledningsdragning, för att fullgod bevattningseffekt ska erhållas.

Det bästa utgångsläget är emellertid att inga täckdiken förekommer inom området, så att man kan planera underbevattningssystemet enbart med hänsyn till de naturliga förutsättningarna och den önskade fältindelningen.

8. Ledningsavstånd vid underbevattning

Vid val av ledningsavstånd för en underbevattning kan man utgå från det ledningsavstånd som skulle ha använts vid normal täckdikning av jorden i fråga, dock ej större än 25 till 30 m. I vissa lägen bör avstånden minskas. Detta gäller framför allt på platser där akvifärens djup är mindre än någon meter och/eller den kapillära zonen ovanför grundvattenytan är liten.

På bleke och gyttjejordar är genomsläppligheten ofta så stor att bevattningseffekten sträcker sig något - några hundratal meter ut från ett dike. Vid så stora ledningsavstånd och de flöden som här är aktuella bör man överväga öppna diken.

Ledningsavståndet som funktion av grundvattendeformationen mellan ledningarna och aktuell evapotranspiration kan beräknas med tämligen enkla jämviktsformler. Tre i stort sett likvärdiga formler presenteras i det följande.

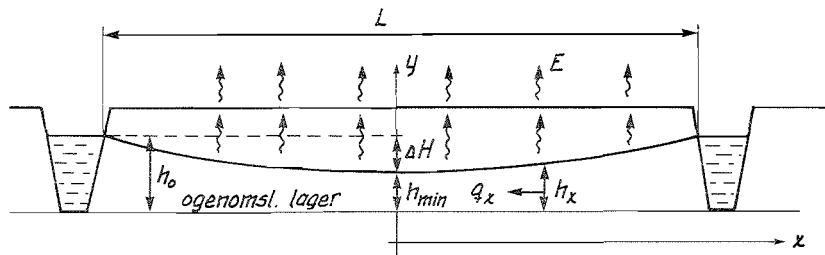
För beräkning dels av de transienta förloppen vid höjning eller sänkning av grundvattnet, dels av lämpliga ledningsavstånd med hänsyn till dessa förlopp, krävs relativt avancerade ekvationer som i allmänhet endast är lösbara med grafiska eller numeriska metoder. Ekvationerna är oftast anpassade till specifika förhållanden, varför ett flertal formler av denna typ kommer att tas upp här. Eftersom varje författare har sina egna angreppsvinklar och randvillkor är det enklast att gruppera formlerna efter författare, vilket också skett.

Vissa grundförutsättningar återkommer ofta i litteraturen. Den vanligaste är att Dupuit-Forchheimers antagande (D-F) gäller, vilket innebär att strömningen betraktas som endimensionell. Antagandet är att strömningen kan liknas vid en vattenström genom ett antal raka, parallella rör. D-F medför högst betydande matematiska förenklingar. I de allra flesta fall gäller visserligen inte D-F i strängt fysikalisk mening, men de fel antagandets tillämpning ger är i allmänhet små.

8.1. Fox' formel för beräkning av ledningsavståndet vid konstant vattenavgång

Fox m.fl. (1956) har utgått från ett jämviktstillstånd mellan infiltration från ett öppet dike, som når ner till det ogenomsläppliga lagret, och vattenavgång genom evapotranspiration (fig. 15). Formeln går i allmänhet även att använda för dräneringsledningar, eftersom tryckförlusten p.g.a. radiell strömning närmast ledningen inte märkbart påverkar grundvattenbågans utseende förrän avståndet mellan ledningen och det ogenomsläppliga lagret överstiger någon meter.

För att formeln ska gälla med rimlig noggrannhet bör jorden vara homogen samt markytan och det ogenomsläppliga lagret i stort sett parallella. Dessutom antas D-F gälla.



Figur 15. Jämvikt mellan evapotranspiration och infiltration. Öppna diken som når det ogenomsläppliga lagret (Fox m.fl., 1956).

Equilibrium between evapotranspiration and infiltration. Open ditches which reach the impermeable layer (Fox & al., 1956).

För att växterna ska få tillräckligt med vatten måste det horisontella flödet per breddenhet i en punkt x vara lika med växternas vattenförbrukning på sträckan mellan punkten x och punkten $x=0$. (Samtliga använda beteckningar finns i bilaga 1.)

$$q_x = E \cdot x \quad (2)$$

Enligt Darcy gäller samtidigt att:

$$q_x = k \cdot I \cdot h_x \quad (3)$$

där k är genomsläpplighetskoefficienten och I gradienten.

Definitionen av gradienten är:

$$I = \frac{dy}{dx} \quad (4)$$

Kombineras (2) och (3) erhålles:

$$I = \frac{E \cdot x}{k \cdot h_x} \quad (5)$$

\Leftrightarrow

$$\frac{dy}{dx} = \frac{E \cdot x}{k \cdot h_x} \quad (6)$$

Efter separation och integrering av ekv (6) fås:

$$y = \frac{E}{k \cdot h_m} \cdot \frac{x^2}{2} + C \quad (7)$$

där h_m är akvifärens medeldjup.

Ekvation (7) ger grundvattenytans form. Dess lägsta punkt erhålles genom nollställning av derivatan (6). Man finner att:

$$\frac{dy}{dx} = 0 \quad \Rightarrow y_{\min} \quad \text{för } x = 0$$

Den maximala depressionen ΔH inträffar alltså vid $x=0$. Samtidigt gäller att:

$$\Delta H = h_0 - h_{\min} \quad (8)$$

och figur 15 ger tillsammans med (7) att:

$$h_0 = h_{\min} + \frac{E}{k \cdot h_m} \frac{(L/2)^2}{2} \quad (9)$$

som insättes i (8).

$$H = \frac{L^2 \cdot E}{8 \cdot k \cdot h_m} \quad (10)$$

Vilket, om man hellre vill ha dikesavståndet explicit uttryckt, kan skrivas som

$$L = 2 \sqrt{\frac{2 \cdot k \cdot h_m \cdot \Delta H}{E}} \quad (11)$$

I denna formel tas ingen hänsyn till vattenavgång genom perkolation, men om den är känd eller kan uppskattas, är det bara att addera dess värde till evapotranspirationen.

Fox m.fl. (1956) ger en betydligt längre härledning av ekvation (11) än den som givits här, en härledning som visar att ekvationen under vissa omständigheter även gäller då marken sluttar.

I de fall då avståndet mellan ledning och ogenomsläppligt lager är stort, kompenseras man för detta genom att föra in ett s.k. ekvivalent avstånd till ogenomsläppligt lager (se 8.4.).

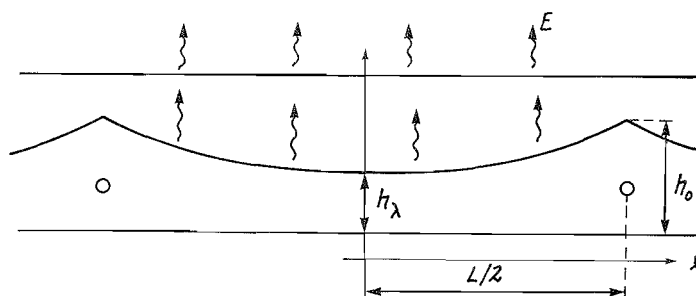
8.2. Hallgren & Sandsborgs formel för beräkning av ledningsavståndet vid konstant vattenavgång

Även vid beräkning enligt Hallgren och Sandsborg (1952) är utgångspunkten jämvikt mellan infiltration och vattenavgång, men infiltrationen förutsättes ske från dräneringsledningar (fig. 16).

Om punkten $x=0$ ligger mitt emellan ledningarna och vissa förenklingar görs, ger ett resonemang i analogi med avsnitt 8.1. följande resultat:

för jämvikt krävs:

$$E \cdot x = h_x \cdot k \cdot \frac{dh}{dx} \quad (12)$$



Figur 16. Jämvikt mellan infiltration från dräneringsledningar och evapotranspiration. (Hallgren & Sandsborg, 1952).

Equilibrium between infiltration from drains and evapotranspiration (Hallgren & Sandsborg, 1952).

Separation och integrering ger:

$$E \cdot x^2 = k \cdot h_x^2 + C \quad (13)$$

Integrationskonstanten, C, bestäms genom insättning av $x=L/2$ och det vid detta x -värde gällande $h_x=h_0$. Ekvation (13) kan nu skrivas:

$$k \cdot h_x^2 - E \cdot x^2 = k \cdot h_0^2 - E \cdot \frac{L^2}{4} \quad (14)$$

Under antagna förutsättningar blir grundvattenytan mellan ledningarna tydligen en hyperbel.

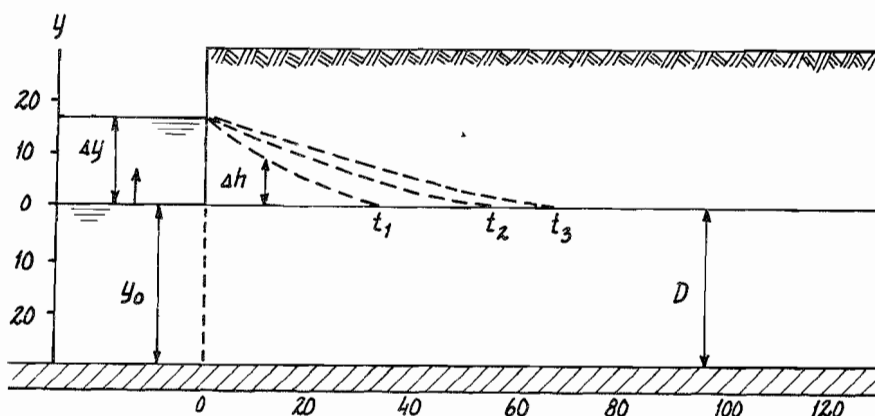
Om L uttrycks explicit erhålles för $x=0$ (då $h_x=h_\lambda$):

$$L = 2 \sqrt{\frac{k (h_0^2 - h_\lambda^2)}{E}} \quad (15)$$

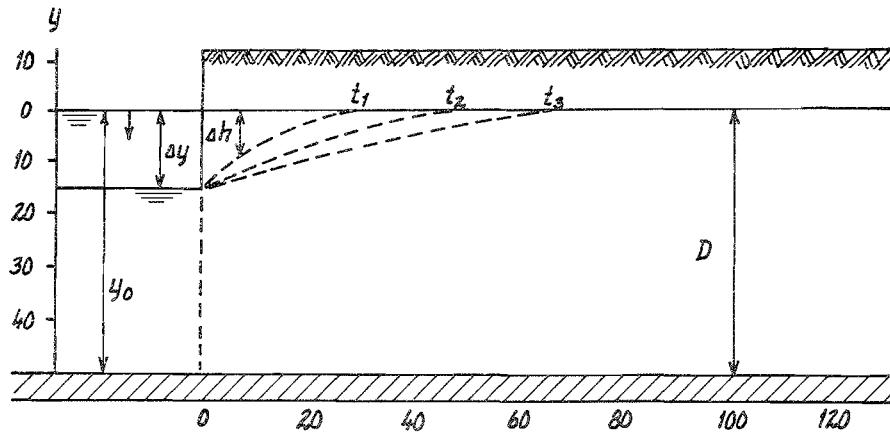
där h_λ är grundvattnets höjd över ogenomsläppligt lager mitt emellan ledningarna.

8.3. Edelmans lösningsmetod för bestämning av grundvattenståndsändringar

Betrakta figurerna 17 och 18. De visar ett tänkt tvärsnitt av marken, vinkelrät mot en kanal. I profilen finns ett plant, ogenomsläppligt lager. Akvifärens djup (D), är avståndet mellan grundvattenytan och det ogenomsläppliga lagret. Jorden ovanför det ogenomsläppliga lagret antas vara homogen och isotrop (lika egenskaper i alla riktningar) med avseende på



Figur 17. Förloppet vid momentan höjning av kanalvattenståndet.
Conditions during momentary rise of the water level in the ditch.



Figur 18. Förloppet vid momentan sänkning av kanalvattenståndet.

Conditions during momentary lowering of the water level in the ditch.

genomsläppligheten. Kanalbotten ligger i anslutning till det ogenomsläppliga lagret. I kanalen står vattnet ursprungligen på höjden y_0 över det ogenomsläppliga lagret. På samma nivå befinner sig också grundvattenytan i utgångsläget.

Om vattenytan i kanalen momentant höjs med värdet Δy vid $t=0$, kommer vattnet att strömma från kanalen och in i marken (fig. 17). Höjningen av vattenytan i kanalen kommer att påverka grundvattennivån ute i fältet på ett allt större avstånd från kanalen allt eftersom tiden fortskrider (t_1 , t_2 osv.). Vattenströmmen in mot fältet kommer att fortgå till ett nytt jämviktstillstånd inställer sig. Hastigheten hos grundvattenytans höjning beror på markens genomsläpplighet och på den porvolym som ska fyllas med vatten. En förutsättning är naturligtvis att man har tillgång på vatten i sådan utsträckning att vattennivån i kanalen kan hållas konstant.

Om det omvända sker, dvs att vattenytan i kanalen momentant sänks med värdet Δy , så strömmar vattnet från marken till kanalen (fig. 18). Därigenom sänks grundvattenytan succesivt på allt större avstånd från kanalen, till dess att vattenståndet i kanal och mark åter är lika.

Såväl vid höjning som vid sänkning förutsättes att inget vatten tillförs genom nederbörd eller bortförs genom evaporation och läckage. I så fall kan grundvattenytans läge tecknas med Boussinesques ekvation:

$$\mu \cdot \frac{\delta h}{\delta t} = k \cdot \frac{\delta}{\delta x} \left(h \cdot \frac{\delta h}{\delta x} \right) - E \quad (16)$$

Edelman (1947) ger lösningar av Boussinesques ekvation för två fall av förändringar i kanalens vattenstånd. Det första och matematiskt sett något enklare fallet är när vattennivån i kanalen ändras momentant. Detta förutsätter mycket stora flöden och/eller små volymer i kanalen som ska fyllas upp eller tömmas.

Det andra fallet, som behandlar den vanligaste situationen vid dämning, är när vattenytan i diket höjs (eller sänks) succesivt. Lösningen i det senare fallet är dock begränsad till en nivåförändring i kanalen som är direkt proportionell mot tiden.

Dessa lösningar erhöles genom att införa två hjälpvariabler, T och u , definierade sålunda:

$$T = \frac{k \cdot D}{\mu} t \quad (17)$$

$$u = \frac{x}{2\sqrt{T}} = \frac{x}{2\sqrt{\frac{k \cdot D \cdot t}{\mu}}} \quad (18)$$

8.3.1. Momentan förändring av vattenståndet i kanalen

Ekvationen för ändringen av grundvattennivån (Δh) i en punkt x vid en momentan sänkning av vattenståndet i kanalen kan skrivas:

$$\Delta h = y_0 - h = -\Delta y \cdot f_0(u) \quad ; \quad \Delta y > 0 \quad (19)$$

Vid en momentan höjning av vattenståndet i kanalen kan grundvattensytans stigning beräknas med formeln:

$$\Delta h = \Delta y \cdot f_0(u) \quad ; \quad \Delta y < 0 \quad (20)$$

där $f_0(u)$ är den komplementära felfunktionen (tab. 1 i bil. 2) och u erhålles ur ekvation (18).

Randvillkoren för ekvationerna (19) och (20) är:

$$\begin{cases} h_0 = y_0 & ; \quad 0 \leq x < \infty, \quad t = 0 \\ h = y_0 - \Delta y & ; \quad x = 0, \quad t > 0 \end{cases}$$

8.3.2. Gradvis förändring av vattenståndet i kanalen

Det normala förloppet vid dämning eller sänkning är att kanalens vattennivå förändras succesivt under en längre period. Den hastighet varmed kanalens vattenyta stiger eller sjunker kan betecknas med α . Kanalvattenståndets förändring, räknat från tiden $t=0$, blir då αt .

Vid en sänkning av kanalvattenståndet erhålles grundvattensytans nivåförändring ur ekvationen:

$$\Delta h = y_0 - h = -\alpha \cdot t \cdot f_2(u) \quad ; \quad \Delta y > 0 \quad (21)$$

Om vattenytan i kanalen höjs, så används:

$$\Delta h = \alpha \cdot t \cdot f_2(u) \quad ; \quad \Delta y < 0 \quad (22)$$

där $f_2(u)$ är andra derivatan av $f_0(u)$. Värdet på $f_2(u)$ kan erhållas ur tabell 1 i bilaga 2.

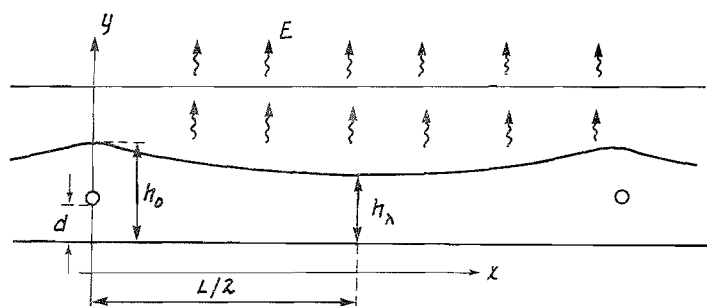
Randvillkoren för dessa båda ekvationer är:

$$\begin{cases} h_0 = y_0 & ; \quad 0 \leq x < \infty, \quad t = 0 \\ h = y_0 - \alpha \cdot t & ; \quad x = 0, \quad t > 0 \end{cases}$$

Edelman (1947) visar också hur man med grafiska metoder kan bestämma k -värdet med utgångspunkt från grundvattenståndsmätningar. För en närmare genomgång av detta, se Segerros (1983).

8.4. Skaggs' formel för lämpligt ledningsavstånd vid jämvikt mellan bevattning och evapotranspiration

För att beräkna grundvattenytans läge vid jämvikt mellan vattentillförsel och evapotranspiration, förutsätter Skaggs (1981) att de horisontella vattenrörelserna i den mättade zonen är försumbara och att D-F gäller. Sedan följer ett resonemang som är besläktat med det som Fox m.fl. (1956) för.



Figur 19. Jämvikt mellan infiltration från dräneringsledningar och evapotranspiration (Skaggs, 1981).
Equilibrium between infiltration from drains and evapotranspiration (Skaggs, 1981).

Origo för koordinatsystemet läggs vid diket (fig. 19) och beteckningarna är enligt tidigare. Flödet i en punkt blir då:

$$q_x = -k \cdot h \cdot \frac{dh}{dx} \quad (23)$$

För att jämvikt mellan tillförsel och evapotranspiration ska råda, gäller:

$$q_x = E \cdot \left(\frac{L}{2} - x\right) \quad ; \quad x \leq L/2 \quad (24)$$

Kombinering av dessa båda ekvationer ger:

$$-k \cdot h \cdot \frac{dh}{dx} = E \cdot \left(\frac{L}{2} - x\right) \quad (25)$$

Separering av variablerna samt integrering ger med gränsvillkoret $h=h_0$ för $x=0$:

$$h^2 = \frac{E}{k} \cdot x^2 - \frac{E \cdot L}{k} \cdot x + h_0^2 \quad (26)$$

Om h är grundvattnets höjd över ogenomsläppligt lager i punkten $L/2$, blir ledningsavståndet:

$$L = 2 \sqrt{\frac{k \cdot (h_0^2 - h^2)}{E}} \quad (27)$$

vilket är samma som ekvation (15). Ekvation (27) kan omformas till:

$$L = 2 \sqrt{\frac{k \cdot \Delta H \cdot (2 h_0 - \Delta H)}{E}} \quad (28)$$

Ekvationerna (27) och (28) ger ungefär samma ledningsavstånd som Fox' formel (ekvation 11). De skillnader som eventuellt uppstår beror på hur man räknar ut h_m i Fox' ekvation. Skaggs använder $h_0 - \Delta H/2$ som medeldjup hos akvifären, vilket ger ett något för stort ledningsavstånd.

Skaggs tar också upp problemet med radiell strömning och därav följande tryckförluster i närheten av dräneringsledningen. Som nämnts under 8.1. brukar man kompensera för detta genom att införa ett ekvivalent avstånd (d') mellan dräneringsledningen och det ogenomsläppliga lagret. Alla andra mått där detta avstånd ingår måste naturligtvis också justeras (D blir D' etc.).

För $d/L < 0,3$ ger Skaggs (1981) följande formel:

$$d' = \frac{d}{1 + \frac{d}{L} \left(\frac{8}{\pi} \cdot \ln \frac{d}{r_e} - 3,4 \right)} \quad (29)$$

där r_e är effektiva ledningsradien. Den effektiva ledningsradien är mindre än den verkliga radien. Detta beror på att endast en liten del av rørets mantelyta är öppen för vatten. Förekommer filter, så inverkar också detta på r_e .

Som ett grovt riktvärde kan man sätta $r_e = 0,1r$, men med ett tjockt och mycket genomsläppligt filter runt ledningen kan det hända att r_e blir större än r (Skaggs & Tang, 1979)

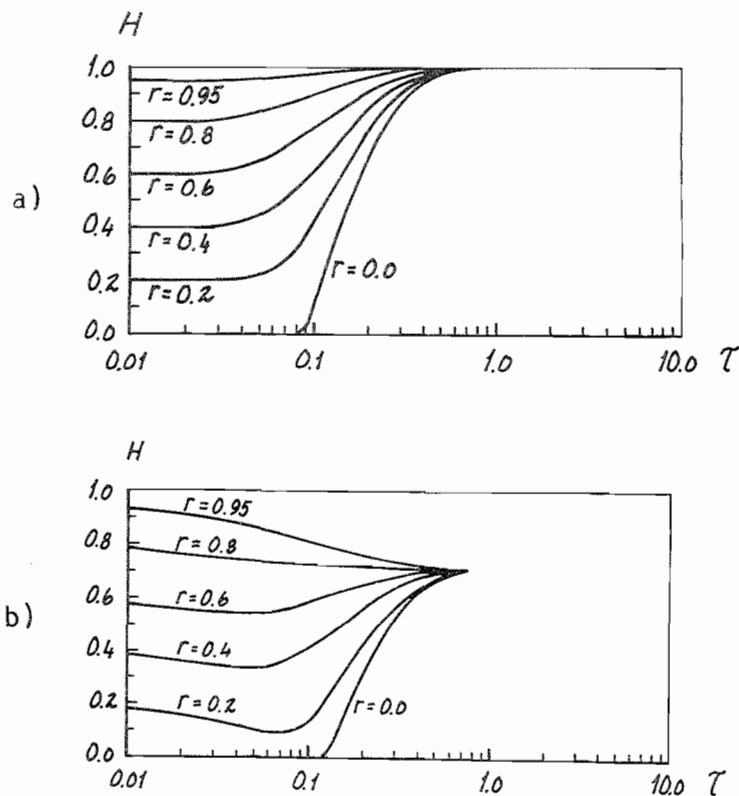
Om hänsyn tas till radiella förluster så måste h_0 i ekvation (28) substitueras med ett ekvivalent akvifersdjup, D^* . Vi får då:

$$L = 2 \sqrt{\frac{k \cdot \Delta H \cdot (2 \cdot D^* - \Delta H)}{E}} \quad (30)$$

8.5. Skaggs' lösning för grundvattenytans stighastighet

Liksom Edelman utgår Skaggs (1973; 1976; 1981) här från Boussinesques ekvation (16). Dessutom förutsättes att grundvattenytan initialt är plan och att vattenståndet i diken höjs momentant. Boussinesques ekvation kan skrivas i dimensionslös form:

$$\frac{\delta H}{\delta \tau} = \frac{\delta}{\delta \xi} \cdot \left(H \cdot \frac{\delta H}{\delta \xi} \right) - \epsilon \quad (31)$$



Figur 20. Nomogram för lösning av Boussinesques ekvation i dimensionslös form. Grundvattenståndshöjningen mitt emellan ledningarna kan erhållas vid:

- a) ingen vattenavgång ($\epsilon = 0,0$)
- b) en vattenavgång definierad av $\epsilon = 2,0$

Nomogram for solving the dimensionless Boussinesque equation. Watertable rise midway between drains is given for:

- a) no water loss ($\epsilon = 0.0$)
- b) water loss ($\epsilon = 2.0$)

där:

$$H = \frac{h}{h_1} \quad (32)$$

$$\tau = \frac{k \cdot h_1 \cdot t}{L^2 \cdot \mu} \quad (33)$$

$$\xi = \frac{x}{L} \quad (34)$$

$$\epsilon = \frac{E \cdot L^2}{k \cdot h_1^2} \quad (35)$$

h_1 är vattenståndet (över ogenomsläppligt lager) intill diket/dräneringsledningen då $t > 0$. Om så behövs, korrigeras för radiell strömning på det sätt som anvisats under 8.4.

Ekvation (31) kan lösas med numeriska metoder, men för våra ändamål räcker det med två nomogram (fig. 20) som visar grundvattenytans rörelse mitt emellan dikena vid två olika värden på det dimensionslösa uttrycket ϵ för vattenavgången. För att kunna utnyttja nomogrammen måste ännu en dimensionslös hjälpvariabel införas, nämligen:

$$\Gamma = \frac{h_0}{h_1} \quad (36)$$

Det är med denna metod inte möjligt att uttrycka L explicit. Däremot går det bra att räkna ut största acceptabla ledningsavstånd vid jämvikt, för att sedan gå in i nomogrammen och kontrollera om stigtiden blir rimlig.

Att vattenståndet till att börja med sjunker i några av fallen, beror på att man förutsatt att den kapillära transportförmågan är tillräcklig för att förse växterna med vatten även från dessa djup.

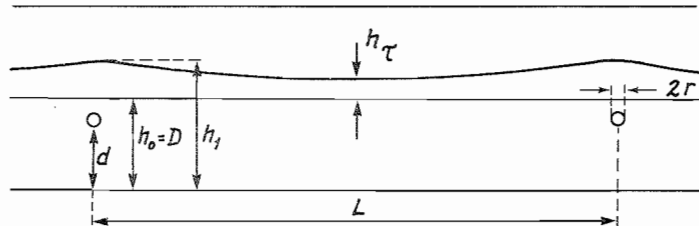
8.6. Sovjetiska formler för stigtid och ledningsavstånd under höjningsfasen

I Sovjetunionen förekommer underbevattning på flera platser. Dessutom finns där omfattande kunskaper på både det teoretiska och praktiska planet. På grund av författarens okunnighet i ryska blir dock presentationen av det sovjetiska kunnandet kort. Till största delen bygger framställningen på Nicolays engelska föreläsningssanteckningar (Nicolay var gästforskare vid SLU under 1980), men också i någon mån på en skrift utgiven av SjevNIIGiM år 1980.

De nuvarande rekommendationerna bygger på teoretiska resonemang, modellförsök (t.ex. jordtank och elektriska modeller) och fältförsök. Vid planering av underbevattning kan det

aktuella området vanligen hänföres till endera av följande fack:

- a) isotrop jord
- b) jord med genomsläppligt ytlager
- c) jord med två olika genomsläppliga lager
- d) anisotrop jord



Figur 21. Utgångsläge samt grundvattenstånd vid tiden t efter påbörjad höjning i en djup, homogen jord.
Initial watertable and elevation of watertable at time t for a deep homogenous soil.

8.6.1. Ekvationer för isotrop jord

Figur 21 visar det antagna utgångsläget och sluttillståndet. Med beteckningar enligt tidigare och figur 21 tecknas ekvationen för dikesavståndet:

$$L = \sqrt{\frac{2 k \cdot h_d \cdot t}{\mu \cdot \gamma \cdot (0,19 + 0,9 \cdot 1g \frac{h_d + h_{\tau-}}{h_d - h_{\tau-}})}} \quad (37)$$

där h_d är tryckhöjden i ledningen och

$$\left\{ \begin{array}{l} \gamma = \frac{1}{1 + \frac{2 \cdot d}{L} \cdot 2,94 \cdot 1g \frac{2 \cdot h_0 -}{2 \cdot \pi \cdot r}} ; \quad h_0 \geq d \\ \gamma = \frac{1}{1 + \frac{2 \cdot h_0}{L} \cdot 2,94 \cdot 1g \frac{2 \cdot h_0 -}{2 \cdot \pi \cdot r}} ; \quad h_0 < d \end{array} \right. \quad (38)$$

vilket innebär att ekvation (37) är en passningsekvation. En enda iteration är oftast tillräcklig för att man ska erhålla ett värde med acceptabel noggrannhet. Om grundvattenytan initialt ligger under ledningsnivån (max 1 m) insättes uttrycket $(h_d + d - D)$ i stället för h_d i ekvation (37) och (38).

Det är också möjligt att uttrycka t explicit:

$$t = \frac{L^2 \cdot \mu \cdot \gamma}{2 k \cdot h_d} \cdot (0,19 + 0,9 \cdot 1g \frac{h_d + h_{\tau-}}{h_d - h_{\tau-}}) \quad (39)$$

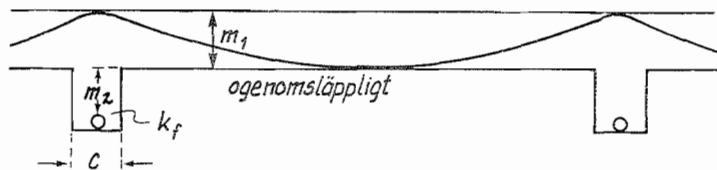
8.6.2. Jord med genomsläppligt ytlager

Som nämnts tidigare bör man inte underbevattna områden där det genomsläppliga (och vattenförande) lagret är av mycket ringa tjocklek (fig. 22), detta p.g.a. systemets känslighet för störningar och lokal torka. Om man ändå vill underbevattna kan följande ekvationer användas för att beräkna ledningsavstånd och stigtid. Ekvationerna (40) och (41) gäller för den inledande fasen då grundvattnet höjs från ledningsnivån till dess att det nått ut mitt emellan dikena:

$$L = 3,24 \sqrt{\frac{k \cdot h_d \cdot t}{\mu \cdot \left(1 + \frac{0,4 \cdot m_2}{h_d - m_2}\right)}} \quad ; \quad \frac{h_d}{m_1 + m_2} = 1 \text{ \AA } 1,5 \quad (40)$$

$$t = \frac{L^2 \cdot \mu}{10,5 \cdot k \cdot h_d} \left(1 + \frac{0,2 \cdot m_2}{h_d - m_2}\right); \quad \frac{h_d}{m_1 + m_2} = 1 \text{ \AA } 1,5 \quad (41)$$

där beteckningarna är enligt tidigare eller framgår av figur 22.



Figur 22. Underbevattning på en jord med ogenomsläpplig alv.
Subirrigation in a soil with an impermeable subsoil.

För det fall då det finns en grundvattenyta genom hela det genomsläppliga skiktet, gäller istället följande två ekvationer:

$$L = 3,24 \sqrt{\frac{k \cdot t}{\mu \left(\frac{1}{h_d} + \frac{0,4 \cdot m_2}{h_d \cdot (h_d - m_2)} + \frac{0,54 \cdot h_\tau}{h_d^2 - 0,5 \cdot h_\tau^2} \right)}} \quad (42)$$

$$t = \frac{L^2 \cdot \mu}{10,5 \cdot k} \cdot \left(\frac{1}{h_d} + \frac{0,4 \cdot m_2}{h_d \cdot (h_d - m_2)} + \frac{0,54 \cdot h_\tau}{h_d^2 - 0,5 \cdot h_\tau^2} \right) \quad (43)$$

För att ekvationerna (40) t.o.m. (43) ska gälla måste genomsläppligheten i återfyllningen vara avsevärt högre än i ytlagret. Även rörgravens bredd spelar en stor roll i sammanhanget. Följande relation bör vara uppfylld:

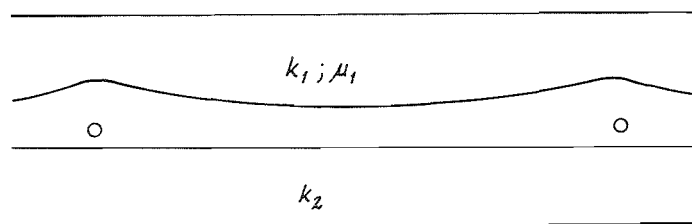
$$k_f \cdot c > 0,1 \cdot k \quad (44)$$

8.6.3. Jord med två lager med olika genomsläpplighet

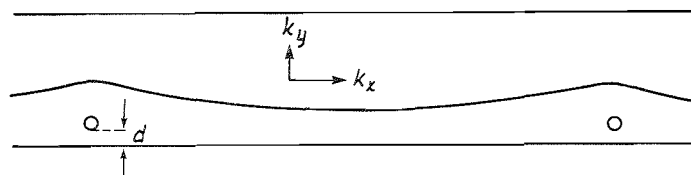
Då jorden är lagrad enligt figur 23, räknar man ut lämpligt ledningsavstånd, dels för det fall då hela profilen har genomsläppligheten k_1 , dels för det fall då hela profilen har genomsläppligheten k_2 . Vid båda beräkningarna använder man dock effektiva porositeten för det övre lagret. Det lämpliga ledningsavståndet erhålles sedan ur en enkel medelvärdesberäkning:

$$L = \frac{L_1 + L_2}{2} \quad (45)$$

För att ekvation (45) ska gälla måste $k_2 > k_1$.



Figur 23. Jord med två lager med olika genomsläpplighet.
Soil with layers of differing permeability.



Figur 24. Anisotrop jord.
Anisotropic soil.

8.6.4. Anisotrop jord

Vanligen känner man genomsläppligheten i endast en riktning. Om det är den horisontella eller vertikala beror på vilken metod som använts för att bestämma k-värdet. När man känner båda k-värdena (fig. 24), används naturligtvis det horisontella för dimensionering av underbevattningen.

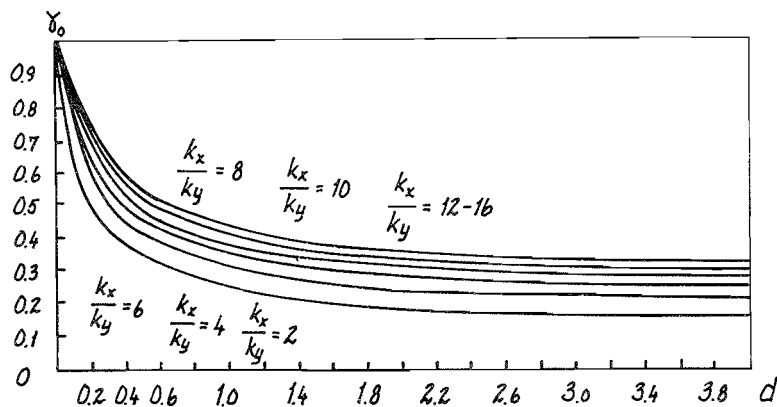
I de fall då akvifären är någorlunda djup och skillnaden är stor mellan horisontellt och vertikalt k-värde, kan man eventuellt tillgripa följande formler:

$$L = \sqrt{\frac{4 \cdot t \cdot \beta \cdot \sqrt{k_x \cdot k_y}}{\mu \cdot \gamma_0 \cdot \left(\frac{1}{2,6 \cdot (h_d - d)} + \frac{1,4 \cdot h_r}{(h_d - d)^2 - 0,5 \cdot h_r^2} \right)}} \quad (46)$$

$$t = \frac{L^2 \cdot \mu \cdot \gamma_0}{4 \cdot \beta \cdot k_x \cdot k_y} \left(\frac{1}{2,6 \cdot (h_d - d)} + \frac{1,4 \cdot h_r}{(h_d - d)^2 - 0,5 \cdot h_r^2} \right) \quad (47)$$

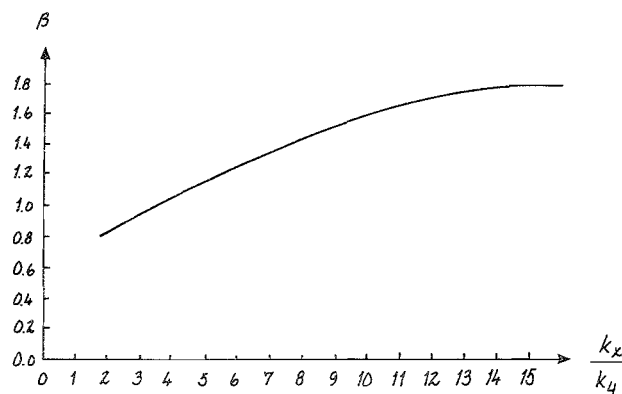
där γ_0 erhålles ur figur 25 och β ur figur 26. Övriga beteckningar enligt figur 24 och tidigare.

Samtliga ekvationer (37) t.o.m. (47) är avsedda för dimensionering av underbevattning och förutsätter, med något undantag, att grundvattnet står i nivå med dräneringsledningarna och att vattenytan är plan. Dessutom krävs att vattentillförseln är så stor att den inte begränsar grundvattnets stighastighet.



Figur 25. Diagram för korrektionsfaktorn γ_0 .

Diagram for the correcting factor γ_0 .



Figur 26. Diagram för anisotropikoefficienten β .

Diagram for β , coefficient of anisotropy.

9. Rördimensionering

Vid underbevattning är det stora volymer vatten som ska flyttas relativt snabbt. Detta gäller dels under höjningsfasen, då grundvattenytan enligt Nicolay (1980) ska kunna höjas minst 0,1 m/dygn, men framför allt vid kraftig nederbörd under växtperioden, då det gäller att rädda grödan genom snabb bortförsel av överskottsvattnet.

Hur stort flöde ledningarna bör dimensioneras för varierar med klimatet, dränerbar porvolym, planerat grundvattenstånd och grödval. En lämplig utgångspunkt är att systemet ska kunna föra bort minst 20 mm nederbörd per dygn, dvs. 2,3 l/s och ha. Vilka ledningsdimensioner som krävs för detta får bestämmas för varje enskilt fall.

10. Filter

Det finns två viktiga skäl att använda filter vid underbevattning. Dels ska filtret förhindra inslamning i röret (selektiv filtreringsfunktion), dels ska det öka genomsläpligheten närmast ledningen (hydrologisk funktion). På bleke och gyttjejordar är det den hydrologiska funktionen som överväger, medan båda funktionerna är av stor betydelse på mojordar och liknande.

Filter kan indelas efter material i syntetiska, organiska och mineraliska. De kan också indelas efter tjockleken i tunna och voluminösa (>7 mm; Knops m.fl., 1979). En tredje indelning är i omlindningsfilter och kringfyllningsfilter (Jonsson, 1985). De filtertyper som används i Sverige i dag, är dels tunna syntetiska eller tjocka organiska (kokos) omlindningsfilter, dels kringfyllningsfilter av grus eller sågspån.

De tunna syntetiska filtren motverkar i allmänhet effektivt inslamning i rören men har ingen nämvärd betydelse för vat-

tenintagningsförmågan. Under vissa förhållanden kan de rent av sättas igen av fina partiklar och minska vattenrörelserna mellan rör och mark.

Kokosfiltren har genom sin grövre struktur sämre filtrerings-effekt, som dock vanligen är fullt tillräcklig. Genom sin tjocklek och struktur har de mycket hög genomsläpplighet och fyller väl den hydrologiska funktionen. Livslängden kan eventuellt vara ett problem. De första kokosfiltren i Sverige lades 1977. Funktionen är fortfarande fullgod, men en viss nedbrytning har iakttagits (Jonsson, 1985)

Sågspån bör fungera bra som filter vid underbevattning (Hallgren & Sandsborg, 1952). Eventuellt kommer nedbrytningen att påskyndas av underbevattningen. Sågspån ger inget skydd mot inslamning underifrån ifall det tillförs på traditionellt sätt, dvs. som kringfyllning sedan rören lagts på plats.

I Nederländerna har torv använts som filter vid underbevattning, men visat sig ha allt för kort livslängd (Knops m.fl., 1979). Enligt samma källa ska torv ha större livslängd än kokos vid konventionell täckdikning.

Grus kan vara ypperligt som filtermaterial. Det kan även vara värdelöst. Funktionen avgörs av kornstorlekssammansättningen. Ett väl sammansatt filtergrus har både hög genomsläpplighet och god filtreringsförmåga, medan ett olämpligt grus antingen har dålig filtreringsförmåga eller låg genomsläpplighet. Enligt föregående är singel "olämpligt" grus, då det saknar filtreringsförmåga. På stabila jordar med hög genomsläpplighet, som bleke och gyttjejordar, är dock singel och liknande utmärkt, då det på dessa jordar främst gäller att minska strömningsmotståndet kring ledningarna. Grus ger inget skydd mot inslamning underifrån, såvida man inte grusar också före rörläggningen.

Med våra nuvarande kunskaper om filtermaterial blir rekommendationen kokosfilter på mo- och sandjordar, medan filtret på grovsprickiga jordar bör utgöras av grovt grus, singel e. dyl.

11. Dämningspunkter

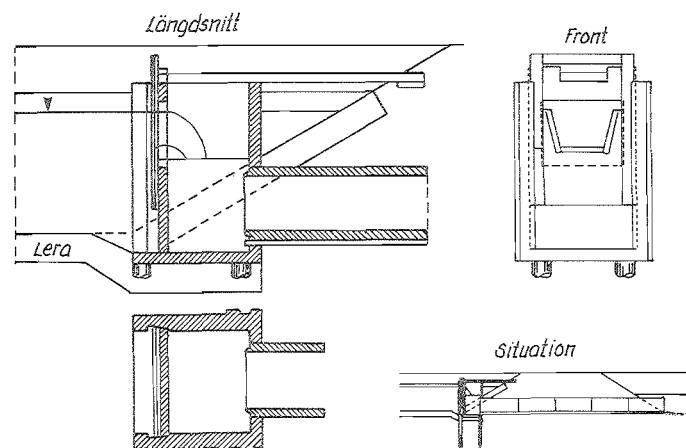
För reglering av vattenståndet ute i fälten måste i ett underbevattningssystem ett flertal dämningspunkter med ställbara dämningsanordningar läggas in. Dämningspunkterna kan lokaliseras såväl till öppna diken som till brunnar/stigarrör inne i fältet. Var och hur tätt dämningspunkterna bör placeras beror främst på topografin, men även jordens kapillära egenskaper och tänkbara grödors rotdjup måste vägas in. Skiftesindelning och ägogränser kan också ha betydelse för placeringen. Som utgångspunkt kan man välja en dämningspunkt för varje 0,1 m fall hos marken. Tillsammans med rekommendationen om max 0,1 m depression i grundvattenytan mellan ledningarna, ger detta en variation på 0,2 m i avståndet grundvattenyta - markyta inom varje delsystem. Redan denna variation kan vara för stor, men många gånger ger även större variation (ibland upp till 0,5 m) fullgod bevattningseffekt.

11.1. Överfallsvärn

Om öppna diken används i systemet är det oftast lämpligt att lägga dämmningspunkterna där samt låta dämmningsanordningarna bestå av ställbara överfallsvärn. Härigenom vinnes två ting: Övervakningen underlättas genom att värnen ligger öppna, och man slipper åtminstone en del brukningshinder i fälten. Överfallsvärnen kan utföras på många olika sätt; i figur 27 visas en typ som är vanlig i Zuiderzeepoldern i Nederländerna (Kalisvaart, 1958). Dessa överfallsvärn tillverkades vid en fabrik och kördes sedan ut med lastbil i samband med att poldern torrlades.

Det enklaste överfallsvärnet för ett öppet dike tillverkas av plankor och I-balk som slås ner i dikesbotten.

Oberoende av hur överfallsvärnet utformas, så bör diket tätas uppströms värnet. Denna tätning har den dubbla uppgiften att minska läckaget förbi överfallsvärnet och hindra att detta undermineras. Vidare bör dikesbotten kläs med sten eller något annat svåreroderbart material omedelbart nedströms värnet.



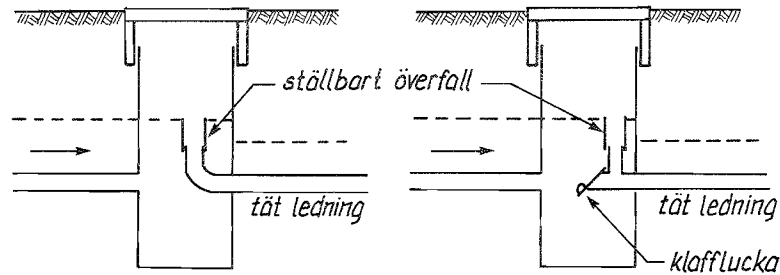
Figur 27. Överfallsvärn använt i Zuiderzeepoldern. Maximalt flöde är 40 l/s vid en nivåskillnad av minst 0,20 m (Kalisvaart, 1958)

Weir with a maximum capacity of 40 l/s, used in the Zuiderzee Polders (Kalisvaart, 1958).

11.2. Dämmningsbrunnar

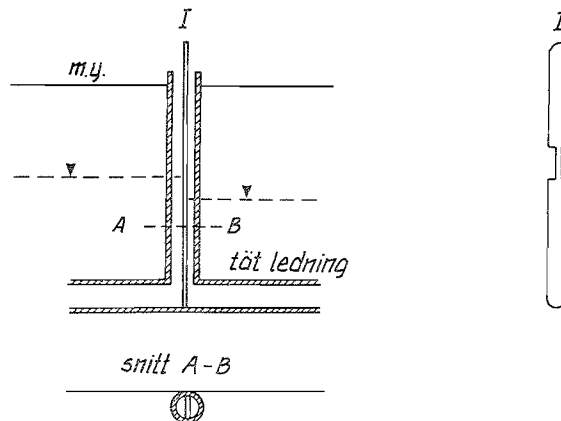
I de fall då dämmningspunkter ska placeras inne i ett fält används brunnar. Exempel på bra sådana ges i figur 28.

Brunnarna görs till exempel av markavloppsrör av PVC-plast. Diametern bör vara 300 - 500 mm, alltefter vilken dimension dräneringsledningen har. Plast ger flera fördelar. Materialet är lätt att bearbeta och sammanfoga (skruv-, nit-, lim- eller svetsförband). Det är inte särskilt tungt, varför brunnarna utan vidare kan tillverkas hemma vid gården och sedan köras ut till fältet. Brunnarna blir också tillräckligt täta. Men en plastbrunn tål inte att köras på. Den måste därför antingen avlastas (fig. 28), eller också utmärkas väl och då gärna sticka upp några dm över markytan.



Figur 28. Exempel på dämmningsbrunnar med avlastningsring av betong.

Two types of damming structure.



Figur 29. Enkel dämmningsbrunn som används till "blocksystemet" i figur 14 (Kalisvaart, 1958).

Simple dam used in the Zuiderzee Polders (see fig. 14) (Kalisvaart, 1958).

En mycket enkel typ av dämmningsbrunn som används i Nederländerna visas i figur 29 (Kalisvaart, 1958). Om denna variant väljes blir kostnaden för dämmningsanordningarna mycket låg.

Oberoende av hur dämmningsbrunnarna utformas, måste de sista metrarna ledning före brunnen vara täta. Eventuellt kan hela stamledningen göras tät.

För att förenkla inställningen av önskad vattennivå bör det vid samtliga dämmningspunkter finnas en vattenståndsmätare. 0-nivån för en sådan sätts lämpligen lika med det normala vattenståndet uppströms den aktuella dämmningspunkten.

12. Drift och övervakning av underbevattning

Det finns fyra olika varianter av underbevattning med reglerat grundvattenstånd. De båda vanligaste är att man antingen håller konstant grundvattenstånd, eller att man låter vattenståndet variera inom vissa bestämda gränser. Den senare varianten

ger större möjlighet att utnyttja den nederbörd som faller under växtsäsongen. En tredje variant är att man höjer grundvattnet i början av växtsäsongen och sedan låter rötterna följa efter en vikande vattenyta mot djupet. Den fjärde och av flera skäl ovanligaste varianten, är att man höjer grundvattennivån till markytan då bevattningsbehov föreligger och sedan dränerar av profilen igen.

Oberoende av vilken variant man väljer, så krävs regelbunden tillsyn av överfallsvärnen och kontroll av vattenståndet ute i fälten. Vattenståndskontrollen sker enklast genom att man placerar några vattenståndsror inom området. Rören kan göras av t.ex. polyetenslang med borrade hål eller stumpar av dräneringslang. Rören placeras med fördel parvis, det ena intill dräneringsledningen och det andra mitt emellan ledningarna. Vattenståndet kontrolleras enkelt med hjälp av ett graderat rör med en slangstump i änden. Det graderade röret sänks ner i vattenståndsroret samtidigt som man blåser i slangen. Då röret når vattenytan hörs detta och vattenståndet (relativt vattenståndsrorets överkant) kan avläsas på det graderade röret.

12.1. Konstant grundvattenstånd

Vid riklig tillgång på vatten är det enklast att låta en ständig ström av vatten gå igenom systemet och därigenom upprätthålla vattennivån. Så länge som vatten rinner över sista överfallsvärnet vet man då, att också resten av systemet får vatten. Med vissa intervall bör dessutom samtliga överfallsvärn kontrolleras tillsammans med vattenståndet ute i fältet.

I samband med väderomslag kan vattenståndet behöva justeras. Det är en fördel om dessa justeringar kan göras med viss framförhållning, så att t.ex. en vattenståndshöjning är klar när en värmebölja kommer. Kom också ihåg att det i allmänhet är lättare att snabbt sänka grundvattnet än att höja det.

En ständig ström av vatten genom systemet medför relativt stort spillflöde över sista överfallsvärnet. Om ingen reglering av tillloppet sker, utan flödet hålls på en nivå som ska klara växternas vattenförsörjning under de allra flesta förhållanden, så kommer i genomsnitt 20 m³/dygn och hektar att rinna förbi sista dämningpunkten. Om ett sådant spillflöde är oacceptabelt, finns det ett par vägar att gå om man ändå vill hålla konstant grundvattenstånd.

Man kan försöka att styra tillflödet efter vädret. Även i detta fall kommer emellertid en del vatten att försvinna förbi sista dämningpunkten. Om tillflödet någon gång skulle bli för litet, så att vattnet inte når systemets alla delar, är det ingen katastrof. Markens vattenförråd kan förse växterna med vatten under minst ett par dagar.

Ett annat alternativ är att gräva en liten reservoar nedströms sista överfallsvärnet och installera en flottörstyrd pump som pumpar tillbaka överskottsvattnet till systemets uppsida. Om man samtidigt styr tillflödet så att en relativt liten pump räcker samt har tillgång till elektricitet, blir detta en tämligen enkel och billig lösning.

Slutligen kan man vid varje varje dämpningspunkt sätta en flot-törstyrd ventil som öppnar när vattenståndet nedströms sjunker under önskad nivå. Även om dessa ventiler kan göras relativt enkla och driftsäkra, får man räkna med att denna lösning kräver betydligt mer tillsyn och underhåll än de båda tidigare nämnda.

12.2. Inom vissa gränser fluktuerande vattenstånd

I allmänhet behöver inte grundvattennivån hållas absolut konstant, utan den kan få variera med tiden inom vissa gränser. Hur stor den lämpliga variationen är, beror dels på markens egenskaper, dels på hur stor variation i avståndet grundvattenyta - markyta som föreligger inom delsystemen.

Den övre gränsen för vattenståndet inträder då vattenhalten i rotzonen någonstans blir så hög att risk för syrebrist uppstår. Den undre gränsen inträder då grundvattenytan ligger så djupt att upptransporten till rotzonen knappt täcker den vattenförlust som evapotranspirationen förorsakar. Eftersom både rötternas syrebehov och växternas transpiration är väderberoende och tilltar med ökande temperatur, går det inte att sätta några absoluta gränser. Så länge lufthalten i rotzonen är minst 10 volymprocent och växterna utan svårighet kan ta upp 6 mm vatten per dag klarar man dock de flesta svenska somrardagar.

På många jordar som är lämpliga för underbevattning kan man tillåta en grundvattenfluktuation av minst 0,1 m, vilket motsvarar ungefär en veckas vattenförbrukning vid normalt sommarväder.

Följden av det nu anförda är att underbevattning ofta kan bedrivas genom att grundvattenytan höjs till önskad nivå en gång per vecka, varefter tillflödet stängs av. Under värmeperioder bör vattenståndet justeras oftare; var tredje till fjärde dag kan vara lämpligt. För att fastställa hur mycket vatten som behöver tillföras samt att det verkligen blir tillfört, bör grundvattenståndet kontrolleras både före och efter höjningen.

Detta sätt att underbevattna är billigt, enkelt och vattenbesparande. Vattenbesparingen beror dels på att inget spillflöde förekommer över sista överfallsvärnet, dels på ett ökande magasin för nederbörd i marken genom att vattenytan större delen av tiden står lägre än överfallsvärnen.

12.3. Vikande grundvattenstånd

Om marken tillåter stort rotdjup och om grödorna som odlas är relativt djuprotade, kan man höja grundvattnet efter sådden och sedan låta växterna försörja sig med vatten genom att rötterna följer vattenytan mot djupet. Även vid denna metod bör grundvattenståndet mätas med vissa mellanrum. Om grundvattnet sjunker snabbt på grund av kraftig evapotranspiration, eller sjunker ovanligt djupt i samband med långvarig torka, kan man höja vattenståndet någon eller några dm.

Detta torde vara den minst arbetskrävande, enklaste, mest vattensnåla och billigaste underbevattningsmetoden, men den begränsar grödvalet till djuprotade grödor.

12.4. Höjning av grundvattenytan till marknivå och därefter dränering

Att vattenmätta jorden underifrån och sedan dränera av den igen är knappast en metod som kan rekommenderas, då den icke synes ha några väsentliga fördelar men väl en rad nackdelar. Den kräver litet ledningsavstånd, eftersom vattenståndet måste kunna förändras snabbt. Ledningssystemet måste ha mycket hög kapacitet för att klara de stora flöden som krävs. Alternativt kan man göra en långt gående uppdelning i delsystem, där varje del bevattnas separat. Vidare så kommer en hel del näringsämnen att följa med dräneringsvattnet ut. Metoden kan möjligen lämpa sig för växthuskulturer och liknande, där den också används i viss utsträckning.

13. Avloppsvatten till underbevattning

13.1. Smittspridning

Det största problemet vid bevattning med avloppsvatten anses vara risken för smittspridning. Denna smittspridning kan ske på tre sätt:

- a) Smitta genom direkt kontakt med vattnet i samband med bevattningen
- b) Vindspridning av smittämnen till omgivningen vid användning av vanliga bevattnings-spridare
- c) Smittspridning via bevattnade produkter

Smittvägarna a) och c) är relativt lätta att komma åt genom god personlig hygien hos dem som arbetar med bevattningen, och genom att man inte använder avloppsvatten för bevattning av grödor som konsumeras råa.

För att komma åt vindspridningen kan man välja endera av följande tre vägar:

- a) Långt gående rening
- b) Skyddszoner kring de fält som bevattnas
- c) Bevattningsmetoder som minimerar vindspridningen

Om man väljer långt gående rening för att bemästra smittspridningen, krävs minst samma rening som i dag, gärna kompletterad med desinficering. (I tabell 2 redovisas reduktionen av smittämnen vid olika reningsgrad.) I de flesta länder där riktlinjer har utarbetats för bevattning med avloppsvatten, får denna vattenkvalité (inkl. desinficering) användas utan några egentliga restriktioner (Jonsson, 1977). De främsta skälen för

att använda avloppsvatten till bevattning i Sverige är dock att det skulle tillåta billigare rening och att växtnäringsämnen i vattnet skulle utnyttjas. Långt gående rening, med därtill hörande kostnader, kan vara en lämplig lösning i länder med vattenbrist, men knappast för Sverige.

Tabell 2. Reduktion av smittämnen i % vid olika reningsprocesser. Aktuella uppgifter för kemisk rening saknas (efter Socialstyrelsen, 1982).

Organism	Försedimentering	Aktivt slam	Desinfektion
salmonella	15	96-99	100
streptococcus faecalis		96	90
koliformer	27-96	97	
virus	obet.	76-99	90
amöbacystor	obet.	obet.	
parasitägg	72-98	obet.	

Skyddszoner måste vara något hundratal meter breda för att nedbringa risken för vindspridning av smittämnen vid spridarbevattning, men någon garanti ger skyddszonerna inte, eftersom spridningsavstånd på upp till 2,5 km konstaterats (Socialstyrelsen, 1982). Om skyddszoner inte bara krävs mot bebyggelse, utan även mot vägar, kommer stora arealer att dras undan från bevattning och alternativet blir mindre intressant.

Då det gäller alternativ till spridarbevattningen, är underbevattning en från smittspridningssynpunkt attraktiv metod. Vattnet kan hållas i ett slutet system och kommer aldrig i kontakt med vare sig människor eller gröda. Smittspridning till brunnar e. dyl. kan i vissa fall ske via grundvattnet. Detta gäller i synnerhet för virus, vilka är både långlivade och relativt lättrorliga i den vattenmättade zonen (Stenström m.fl., 1980). Naturvårdsverket rekommenderar en strömningstid av minst 2 månader mellan föroreningspunkt och brunn (SNV, 1974) och ger följande riktvärden för skyddsavstånd: sand och grus >90 m, grovmo 25 - 90 m, sandig-moig morän 5 - 35 m. Risken för smittspridning via grundvattnet får dock anses som liten.

13.2. Tekniska problem

Den rening som erhålles vid de olika stegen i det som slentrianmässigt kallas "trestegsrening" redovisas i tabell 3. Som nämnts ovan är det främst för att göra reningen billigare och för att utnyttja växtnäringsämnen i avloppsvattnet som avloppsbevattning kan vara motiverad i Sverige. Detta innebär att ju tidigare i reningsprocessen man tar ut bevattningsvattnet,

desto bättre uppfylls de båda målen. Å andra sidan måste såväl risken för smittspridning som kravet på driftsäkerhet hos bevattningsanläggningen beaktas. För att avloppsvattnet över huvud taget ska kunna användas till bevattning, måste det renas mekaniskt. I det inkommande vattnet finns nämligen allt från små pappers och plastbitar till handdukar och andra mer eller mindre förbluffande föremål. För spridarbevattning är det tekniskt möjligt att använda vattnet så snart alla grova, fasta föroreningar avlägsnats.

Tabell 3. Ungefärlig reduktion i % efter de olika reningsstegen vid "trestegsrening"

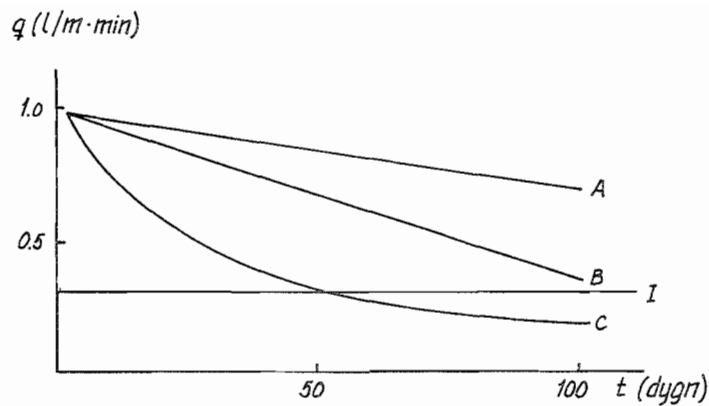
	Sedimentering	Aktivt slam	Kem. fällning
SS	90	90	90
BS ₇	30	90	95
P	15	30	90
N	10	25	25-50

Då det gäller underbevattning måste de mekaniska reningskraven ställas avsevärt högre, eftersom rörslitsar och markporer lätt sätts igen av partiklar som följer med vattnet. I den miljö som uppstår i ett dräneringsrör vid underbevattning kommer dessutom eventuellt organiskt material att brytas ner under anaerob bakterietillväxt. Används vatten som bara är mekaniskt renat, blir den mikrobiella tillväxten så kraftig att hela systemets funktion på mycket kort tid äventyras (Brink pers. medd.).

Även biologiskt renat vatten innehåller en hel del organisk substans samt suspenderat material. Många gånger är mängden tillräcklig för att inom loppet av en bevattningssäsong allvarligt försämra systemets funktion. Under ett försök som utförts vid Avdelningen för lantbrukets hydroteknik under år 1983, infiltrerades biologiskt renat avloppsvatten via dräneringsledningar. Igenväxningen var relativt snabb och kan sammanfattas med figur 30.

Infiltrationen mättes vid en tryckdifferens på 5 till 6 kPa (0,5 till 0,6 m vp). Vid praktisk underbevattning kan så stor tryckskillnad endast accepteras under höjningsfasen. Under den stationära fasen bör tryckdifferansen mellan mark och ledning inte överstiga någon kPa (någon dm vp). Då värdena i figur 30 sjunker under linje I innebär det att infiltrationen från ledningarna skulle vara otillräcklig en varm sommardag vid 20 m ledningsavstånd och tryckdifferansen 1 kPa mellan ledning och mark. Observera också att ledningen med kokosfilter är den som tycks växa igen snabbast (jfr vad som sagts om filter under 10.).

Då rören inspekterades, konstaterades slamavlagringar i samtliga. Även i detta avseende var röret med kokosfilter sämst; slammet fyllde här halva röret.



Figur 30. Infiltration av avloppsvatten. När kurvorna går under linjen I är kapaciteten otillräcklig för att försörja grödan med vatten en varm dag vid 20 m ledningsavstånd.

- A) naken ledning ovanför grundvattenytan
- B) naken ledning under grundvattenytan
- C) kokoslindad ledning under grundvattenytan

Infiltration of waste water from drainage pipes, $\phi = 50$ mm. When the curve lies below line I, infiltration is insufficient to cover evapotranspiration on a warm summers day (drain spacing = 20 m).

- a) bare pipe above the watertable*
- b) bare pipe below the watertable*
- c) pipe with coconut fibre wrapping below the watertable*

13.3. Övriga miljöaspekter

För att bevattning med avloppsvatten ska vara ett riktigt attraktivt reningsalternativ, så måste resultatet vara likvärdigt med konventionell rening. Vid spridarbevattning kan resultatet många gånger överträffa vanlig rening. Även vid underbevattning blir resultaten i de flesta fall mycket bra, men vissa problem kan uppstå.

Bevattningsvattnet kommer att innehålla en del kväve; 10 till 20 mg/l är troligt. Av detta kväve kommer kanske hälften att förbrukas av grödan och en del att reduceras till fritt kväve i samband med den anaeroba mikrobiella tillväxten. Återstoden kommer dels att följa med dräneringsvattnet när vattenståndet sänks i samband med skörden, dels att följa med läckvattnet till omgivning och grundvatten. Kvävet som följer med dräneringsvattnet kommer knappast att vålla några problem, då kvävereduktionen vid underbevattning bör vara klart större än vid "trestegsrening". Om hänsyn dessutom tas till bevattningsvattnets kväveinnehåll vid gödslingen, blir kvävebelastningen på omgivningen avgjort mindre än vid konventionell rening. Däremot kan kväveläckaget till grundvattnet på längre sikt ställa

till problem, i synnerhet som nitrithalten i bevattningsvattnet kan vara hög. I bevattningsvattnet från Sölvesborgs reningsverk har nitrithalter på upp till 8 mg/l uppmätts. Detta kan jämföras med Socialstyrelsens rekommendation på högst 0,02 mg/l i dricksvatten. På platser där det genomsläppliga lagret är djupt och det artificiella grundvattnet läggs ovanpå en befintlig grundvattenyta, kan man i sämsta fall på några få år förstöra grundvattnet.

Fosfor i det biologiskt reade vattnet, lär däremot inte medföra några problem. Den kommer i stor utsträckning att fastläggas i marken, och man kan räkna med minst 80 % reduktion vid de låga belastningar som är aktuella vid underbevattning (Culp m.fl., 1978), men oftast torde reduktionen bli ännu större. Någon större risk för att marken på längre sikt ska bli mättad med fosfor föreligger knappast, eftersom de mängder som tillförs med bevattningsvattnet är relativt ringa. I bevattningsvattnet från Sölvesborg har halter på 6 mg/l uppmätts.

Det slam som bildas i ledningarna ställer inte bara till problem under bevattningsfasen, utan är till förtret även då grundvattnet sänks i slutet på växtsäsongen. Risk finns att slammet spolats loss och följer med dräneringsvattnet ut i diken och åar. Denna risk uppträder vid en tidpunkt då vattenståndet i våra vattendrag är lågt och temperaturen hög. I denna miljö kommer förmodligen det tillförda slammet att snabbt brytas ner, eventuellt med syrebrist som följd. I den anaeroba miljö där slammet bildats, kan också föreningar som är skadliga för recipientens flora och fauna uppstå.

Icke heller risken för att slammet bildar stoppar i ledningarna i samband med att bevattningen avslutas för säsongen får negligeras.

Sammanfattningsvis kan anföras att avloppsvatten inte bör användas i underbevattningssystem. Då avloppsvatten ska användas till bevattning rekommenderas i stället bevattning med ramp (Alinder, 1984) eller med konventionella spridare.

14. Ekonomi

14.1. Investeringar

Det som slutligen avgör vilken bevattningsmetod som väljs är ekonomin. På platser som är lämpliga för underbevattning ställer sig denna ofta mest ekonomisk om området ändå ska täckdikas. I så fall kan systemet optimeras med hänsyn till bevattningsfunktionen och antalet dämningpunkter hållas nere. Merinvesteringen för underbevattning jämfört med "ren" täckdikning kan då stanna under 500 kr/ha. I denna kostnad är dock inte eventuella pumpar och vattenmagasin inräknade. De pumpar som krävs vid underbevattning ställer sig dock billigare än pumpar för andra bevattningsmetoder (ytbevattning undantagen), eftersom det aldrig är fråga om att sätta vattnet under tryck.

Om det krävs vattenmagasin för att trygga tillgången på vatten, måste dessa vara större vid underbevattning än vid andra bevattningsmetoder. Detta beror på läckaget från området och därav följande större vattenförbrukning (jfr avsnitt 5.7.). Under gynnsamma förutsättningar kan det räcka med ett magasin som är 20 % större än vad som krävs vid spridarbevattning, men ofta behövs betydligt större magasin. Merkostnaden för ett större magasin ligger ofta över 500 kr/ha.

Tabell 4. Investering och årskostnader för olika bevattningssystem.
Kapacitet: 35 mm inom 10 dygn

Typ av anläggning	Investering, kr/ha	Årskostnad kr/ha (ca 100 mm)
Rör, rör-slangsystem	3.000- 8.000	1.500-2.000
Bevattningsmaskin, flyttbar stamledning, ytvatten	4.000-10.000	1.500-2.500
Bevattningsmaskin, fast stamledning, borrar brunn	6.000-12.000	1.500-2.500
Helläckande rörsystem	10.000-20.000	2.500-4.000
Droppbevattning (frukt o bär)	12.000-20.000	2.500-4.000
Underbevattning	7.000-12.000	800-1.800

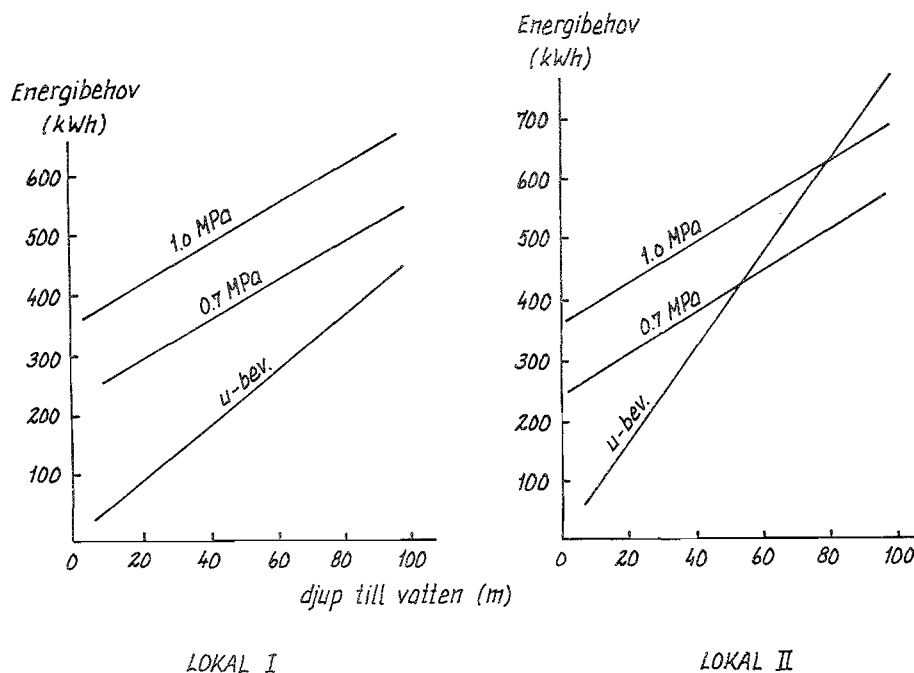
I tabell 4 redovisas investeringsbehov och årskostnad per hektar. Observera att i kostnaden för underbevattning ingår täckdikning med 6.000 kr/ha samt pump för vattenförsörjningen. I de fall en befintlig täckdikning kan utnyttjas och/eller vattenförsörjningen klaras utan pump, blir såväl investerings- som årskostnad lägre än vad som framgår av tabellen. Ett eventuellt vattenmagasin ingår inte i beräkningarna.

14.2. Årskostnad

I årskostnaderna ingår ränta, avskrivning, arbete, energiförbrukning och underhåll. Räntan är satt till 12,5 % och avskrivningstiden till 10 år, utom för dräneringssystemet och nedgrävda ledningar, som skrivs av på 20 år. I samtliga fall förutsätts att ytvatten finns att tillgå i nära anslutning till det bevattnade området.

I fråga om energibehovet gäller att detta är direkt avhängigt den totala vattenvolym som måste pumpas och det tryck som pumpen ger. Massey m.fl. (1983) har jämfört vattenförbrukning och energibehov vid underbevattning resp. spridarbevattning för några olika jordar och lokaler i USA. Av dessa ska två kortfattat beröras här.

Nettovattenbehovet var i båda fallen 90 mm/år. Spridarbevattningens verkningsgrad sattes till 70 %, vilket betyder ett totalt vattenbehov av 130 mm. Beroende på skilda markförhållanden krävde underbevattningen 170 mm (lokal I) resp. 300 mm (lokal II) per år. Totala energibehovet för de olika alternativen beräknades sedan som en funktion av djupet till vatten (fig. 31). Vid stora djup till vatten resulterade det större vattenbehovet för underbevattning i högre energiförbrukning.



Figur 31. Energibehovet som funktion av djup till vatten vid spridar- resp. underbevattning. Lokal II har mer än dubbelt så stort läckflöde som lokal I vid underbevattning (Massey m.fl., 1983).
Energy consumption as a function of depth to water for two sites with differing permeabilities. Sprinkler irrigation at two different pressures and subirrigation (=u-bev) (Massey & al, 1983)

14.3. Arbetsbehov

Hur stort arbetsbehovet blir vid underbevattning beror dels på hur denna går till, dels på de naturliga förutsättningarna. Den minst arbetskrävande varianten är när man utnyttjar naturlig tillrinning för att höja vattnet ovanför en fördämning, i förhoppning att tillflödet ska räcka hela sommaren. Den sammanlagda arbetstiden för bevattning kan då röra sig om några minuter per ha och år. Å andra sidan kan man inte räkna med fullgod bevattningseffekt varje år om denna enkla metod används.

Den mest arbetskrävande formen av underbevattning (som kan rekommenderas) torde vara då grundvattenytan tillåts att fluktuera. När tidsåtgången för alla vattenståndsjusteringar och kontroller summerats, så kan man för små områden komma fram till ett sammanlagt arbetsbehov av kanske mer än 3 timmar per hektar och år. Arbetsåtgången per arealenhet minskar emellertid med ökande areal och kan för områden av större storlek ligga under 0,5 timmar per hektar och år.

15. Sammanfattning

Underbevattning genom reglering av grundvattenståndet är i princip en mycket attraktiv form av bevattning. Metoden ställer emellertid ett flertal krav på området som ska bevattnas. Det måste vara ett område med jämn markyta och ingen eller endast ringa lutning. Marken måste ha relativt stor genomsläpplighet så att man kan skapa och vidmakthålla en artificiell grundvattenyta på lämpligt djup under markytan. För att vattenförbrukningen ska hållas på rimlig nivå måste dessutom en tät horisont eller en naturligt hög grundvattenyta finnas, som hindrar vattnets rörelse nedåt i profilen.

För att fullgod bevattningseffekt ska uppnås bör variationen i avståndet mellan grundvattenyta och markyta inte överstiga 0,1 - 0,5 m (jordartsberoende). För att uppnå detta behöver vanligen ett flertal dämpningspunkter projekteras in.

På jordar lämpade för underbevattning är vanligen samma dikesavstånd som tillämpas vid konventionell dränering tillfyllest även för underbevattning. Dräneringsledningarna bör vara försedda med filter för att minska risken för inslamning och för att underlätta vattnets rörelser mellan jord och ledning.

Vattenförbrukningen är större vid underbevattning än vid spridarbevattning, dels beroende på att ett visst läckage till omgivningen alltid förekommer, dels på att en del vatten åtgår för att höja grundvattennivån.

Vattnet som används måste vara relativt fritt från suspenderade ämnen och salter. Det får heller inte innehålla nämnvärda mängder organiskt material, eftersom detta leder till bakterietillväxt i ledningarna och till att systemets funktion därigenom äventyras. Av denna anledning är det oftast mindre lämpligt att använda någon form av avloppsvatten till underbevattning.

Underbevattning kan från praktisk synpunkt bedrivas på tre sätt:

- a) Konstant grundvattenstånd under växtperioden
- b) Grundvattenståndet tillåts fluktuera mellan vissa på förhand bestämda gränser
- c) Vattenståndet höjs i början av växtperioden, varefter grödans rötter får följa efter den vikande grundvattenytan (förutsätter stort rotdjup)

Av dessa är det sista sättet minst arbets- och energikrävande, men också de andra står sig gott vid jämförelse med konventionella bevattningsmetoder.

16. Summary

Subirrigation through regulation of groundwater levels is, in principle, a very favourable form of irrigation. There are, however, some requirements which must be met by the area to be irrigated.

The area must have a level surface and little or no slope. The soil must have a relatively high permeability so that an artificial watertable can be created and maintained at a suitable depth below the soil surface. So that water consumption can be kept to a reasonable level, the soil must have a dense layer or a naturally high watertable to reduce downward flow of water in the profile.

To achieve a maximum irrigation effect, variation in distance between soil surface and watertable should not be greater than 0.1 - 0.5 m (depending on soil type). This usually requires the installation of several weirs.

On soils which are suitable for subirrigation, the drain spacing used in conventional drainage is usually satisfactory for subirrigation. Drainage pipes should be surrounded by a filter to reduce the risk of clogging and to promote water movement between soil and pipe.

Water consumption is greater for subirrigation than for sprinkler irrigation, partly because some leakage into the surrounding area is unavoidable and partly because a certain quantity of water is required to elevate the watertable.

The water used must be relatively free from suspended substances and salts. It must also be relatively free from organic material, which leads to bacterial growth in the pipe system and reduces its functioning. Because of this, waste water is less suitable for subirrigation.

Subirrigation can be carried out in three ways:

- a) constant watertable during the growing season
- b) the watertable is allowed to fluctuate between certain pre-determined levels
- c) the watertable is elevated at the start of the growing season, after which the crop roots follow the sinking water level (requires deep rooting).

Of these, the last method demands least labour and energy inputs but, if the site is suitable, all three methods are more effective than conventional methods.

16. Litteraturförteckning

- Alinder, S. 1984. Alternativa bevattningsformer 1. Bevattningsramp. - Sveriges Lantbruksuniversitet, Uppsala. Avd. för lantbrukets hydroteknik. Rapport 141. 29 s.
- Bloemen, G.W. 1980a. Calculation of hydraulic conductivities of soils from texture and organic matter content. - Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde 143:5, s. 581-605.
- Bloemen, G.W. 1980b. Calculation of steady state capillary rise from the groundwater table in multi-layered soils. - Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde 143:6, s. 701-719.
- Clinton, F.M. 1948. Invisible irrigation on Egin Bench. - The Reclamation Era 34:10 s. 182-184.
- Culp, R.L., Wesner, G.M. & Culp, G.L. 1978. Handbook of advanced wastewater treatment, 2:a uppl. New York: van Nostrand Reinhold Company.
- Edelman, J.H. 1947. Over de beretning van grondwaterstromingen. Dissertation. Delft. (Mimeographed).
- Fox, R.L., Phelan, J.T. & Criddle, W.D. 1956. Design of subirrigation systems. - Agricultural Engineering, 37:2, s. 103-107.
- Hallgren, G., Nääs, O. & Wiklert, P. 1965. Undersökningar rörande grundvattenuppdämning i blekejord på Gotland åren 1942-1961. - Grundförbättring 18:4, s. 179-240.
- Hallgren, G. & Sandsborg J. 1952. Hydrologiska undersökningar (rörande planerad invallning i Lundåkrabukten). - Grundförbättring 5:1, s. 13-26.
- Heiwall, H. 1980. Underbevattning. Studier av grödans tillväxt och vattenförbrukning vid olika djup till grundvattenytan på en sandig grovmo. - Sveriges Lantbruksuniversitet, Uppsala. Avd. för lantbrukets hydroteknik. Rapport 124. 17 s.
- Hillel, D. 1980. Fundamentals of soil physics. New York: Academic Press.
- Johnson, A.I. 1966. Specific yield. Compilation of specific yields for various materials. - United States Geological Survey. Open file report. Denver, Colorado.
- Jonsson, E. 1977. Bevattning med förorenat vatten. Hygieniska risker för människor och djur. - Sveriges Lantbruksuniversitet, Uppsala. Avd. för hydroteknik. Stenciltryck 107. 30 s.
- Jonsson, B. 1985. Organiska och syntetiska fibermaterial som dräneringsfilter. - Sveriges Lantbruksuniversitet, Uppsala. Avd. för lantbrukets hydroteknik. Rapport 145. 46 s.

- Kalisvaart, Ir. C. 1958. Subirrigation in the Zuiderzee polders. - International Institute for Land Reclamation and Improvement (ILRI), Wageningen. Publication 2. 55 s.
- Knops, J.A.C., Zuidema, F.C., van Someren, C.L. & Scholten, J. 1979. Guidelines for the selection of envelope materials for subsurface drains. - International Institute for Land Reclamation and Improvement (ILRI), Wageningen. Publication 25, s. 439-450.
- Massey, F.C., Skaggs, R.W. & Sneed, R.E. 1983. Energy and water requirements for subirrigation vs. sprinkler irrigation. - American Society of Agricultural Engineers. Transactions of the ASAE 26:1, s. 126-133.
- Rawitz, E. & Heller J. 1969. Special irrigation methods and accessory devices. Ingår i: "Irrigation in arid zones", (draft edition) utg. av B. Yaroni, E. Danfors och Y. Vaidia, s. 211-212. Bet-Dagan.
- Segeiros, M. 1983. Inverkan av uppdämning på grundvattenstånd. En studie på Mästermyr. - Sveriges Lantbruksuniversitet, Uppsala. Avd. för lantbrukets hydroteknik. Examensarbete. 67 s.
- SjevNIIGiM - Sjevjernij Naotsjno-Issljedovatjelskij Institutot Gidrotechniki i Melioratsii. 1980. Vremjennije rekomendatsii po regliovaniju vodnogo resjima obvalovannich (poldernich) zemel. Leningrad.
- Skaggs, R.W. 1973. Water table movement during subirrigation. - American Society of Agricultural Engineers. Transactions of the ASAE 16:5, s. 988-993.
- Skaggs, R.W. 1976. Determination of the hydraulic conductivity. Drainable porosity ratio from water table measurements. - American Society of Agricultural Engineers. Transactions of the ASAE 19:1, s. 73-80, 84.
- Skaggs, R.W. 1981. Water movement factors important to the design and operation of subirrigation systems. - American Society of Agricultural Engineers. Transactions of the ASAE 24:6, s. 1553-1561.
- Skaggs, R.W. & Tang, Y.K. 1979. Effect of drain diameter, openings and envelopes on water table drawdown. - American Society of Agricultural Engineers. Transactions of the ASAE 22:2, s. 326-333.
- SNV. 1974. Små avloppsanläggningar. Rening av spillvatten från enstaka fastigheter. - Statens Naturvårdsverk, Solna. Publikation 1974:15. 29 s.
- Socialstyrelsen. 1982. Bevattning med avloppsvatten. - Socialstyrelsen redovisar 1982:6.
- Stenström, T.A., Hoffner, S. & von Brömssen, U. 1980. Reduktion av bakterier och virus vid avloppsvatteninfiltration i mark. En kunskapssammanställning. - Statens Naturvårdsverk, Solna. SNV PM 1329. 34 s.

- Stephens, J.C. 1955. Drainage of peat and muck lands. Ingår i "Water, the Yearbook of Agriculture 1955", s. 539-557. Washington D.C.: United States Department of Agriculture.
- Tang, Y.K. & Skaggs, R.W. 1980. Drain depth and subirrigation in layered soils. - American Society of Civil Engineers. Irrigation and Drainage Division, Journal 98:IR2, s. 113-122.
- Traktorjournalen. 1974. Bevattning genom täckdiken. - Traktorjournalen 26:9, s. 306-307.
- Wiklert, P. 1960. Studier av rotutvecklingen hos några nyttoväxter med särskild hänsyn till markstrukturen. - Grundförbättring 13:3, s. 113-148.
- Williamson, R.E & Kriz, G.J. 1970. Response of agricultural crops to flooding, depth of water table and soil gaseous composition. - American Society of Agricultural Engineers. Transactions of the ASAE 13:2, s. 216-220.

Övriga referenser:

- Brink, N. 1982. Personligt meddelande. - Sveriges Lantbruksuniversitet, Uppsala. Försöksavd. för vattenvård.
- Nicolay. 1980. Skriftligt underlag, avfattat på engelska, till en föreläsning i ämnet hydroteknik, hållen vid Sveriges Lantbruksuniversitet våren 1980.

Använda beteckningar

- C = integreringskonstant
 c = rörgravens bredd (m)
 D = akvifärens djup, vanligen lika med h_0 (m)
 D' = ekvivalent akvifärsdjup (m)
 d = verkligt avstånd mellan dräneringsledning och tät horisont (m)
 d' = ekvivalent avstånd mellan dräneringsledning och tät horisont (m)
 E = evapotranspiration (m/s, m/dygn)
 $f_0(u)$ = komplementära felfunktionen, se bil.2
 $f_2(u)$ = andra derivatan till $f_0(u)$, se bil. 2
 H = dimensionslös variabel; se ekv. (32)
 ΔH = största grundvattendeppression mellan ledningarna (m)
 h = avstånd mellan ogenomsläppligt lager och grundvattenyta (m)
 Δh = ändring i grundvattenstånd (m)
 h_d = tryckhöjd i dräneringsledningen (m)
 h_m = medelvärde för h (m)
 h_λ = grundvattenhöjd över ogenomsläppligt lager mitt emellan dikena (m)
 h_τ = grundvattenytans höjning mitt emellan ledningarna efter tiden t (m)
 h_0 = grundvattenhöjd över ogenomsläppligt lager vid diket/dräneringsledningen vid tiden $t=0$ (m)
 h_1 = vattenstånd (över ogenomsläppligt lager) vid diket när $t>0$ (m)
 I = gradient (dimensionslös)
 k = genomsläpplighetskoefficient (m/s, m/dygn)
 k_f = genomsläpplighetskoefficient för återfyllningen (m/s, m/dygn)
 k_x = horisontell genomsläpplighetskoefficient (m/s, m/dygn)
 k_y = vertikal genomsläpplighetskoefficient (m/s, m/dygn)

- k_1 = genomsläpplighetskoefficient i skikt 1 (m/s, m/dygn)
 k_2 = genomsläpplighetskoefficient i skikt 2 (m/s, m/dygn)
 L = dikesavstånd (m)
 L_1 = ledningsavstånd då $k=k_1$ (m)
 L_2 = ledningsavstånd då $k=k_2$ (m)
 m_1 = genomsläppliga ytlagrets mäktighet (m)
 m_2 = rörgravens djup i den ogenomsläppliga alven (m)
 q = flöde (m/s, m/dygn)
 q_x = flöde i punkten x (m/s, m/dygn)
 r_e = effektiv ledningsradie (m)
 T = hjälpvariabel använd av Edelman (1947); se ekv. (17)
 t = tid (s, dygn)
 u = hjälpvariabel använd av Edelman (1947); se ekv. (18)
 Δw = ändring i jordens vatteninnehåll (m)
 x = horisontalkoordinat (m)
 y = vertikalkoordinat (m)
 Δy = ändring i dikets vattenstånd (m)
 y_0 = initialt vattenstånd i diket (m)
 α = stig- eller sjunkhastighet hos vattenytan i diket (m/s, m/dygn)
 β = anisotropikoefficient, erhålles ur figur 26
 Γ = dimensionslös hjälpvariabel; se ekv. (36)
 γ = korrektionsfaktor, erhållen ur ekv. (38)
 γ_0 = korrektionsfaktor, erhållen ur figur 27
 ϵ = dimensionslös hjälpvariabel; se ekv. (35)
 μ = effektiv porositet, magasineringskoefficient (dimensionslös)
 μ_1 = effektiv porositet i skikt 1 (dimensionslös)
 ξ = dimensionslös hjälpvariabel; se ekv. (34)
 τ = dimensionslös hjälpvariabel; se ekv. (33)

Bilaga 2.

Värden för $f_0(u)$, $f_1(u)$ och $f_2(u)$ i den komplementära
felfunktion

u	$\frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot e^{-u^2}$	$f_0(u)$	$f_1(u)$	$f_2(u)$
0.000	0.5642	-1.0000	1.1284	-1.000
0.025	0.5638	-0.9717	1.0794	-0.9448
0.050	0.5628	-0.9436	1.0312	-0.8920
0.075	0.5610	-0.9155	0.9849	-0.8416
0.100	0.5586	-0.8875	0.9397	-0.7935
0.125	0.5554	-0.8596	0.8960	-0.7476
0.150	0.5516	-0.8320	0.8537	-0.7039
0.200	0.5421	-0.7773	0.7732	-0.6227
0.250	0.5300	-0.7237	0.6982	-0.5497
0.300	0.5157	-0.6714	0.6285	-0.4829
0.350	0.4991	-0.6206	0.5639	-0.4232
0.400	0.4808	-0.5716	0.5042	-0.3699
0.450	0.4608	-0.5245	0.4495	-0.3222
0.500	0.4394	-0.4795	0.3993	-0.2799
0.550	0.4169	-0.4367	0.3534	-0.2423
0.600	0.3936	-0.3961	0.3119	-0.2090
0.650	0.3698	-0.3580	0.2741	-0.1798
0.700	0.3456	-0.3222	0.2402	-0.1540
0.750	0.3215	-0.2888	0.2097	-0.1315
0.800	0.2975	-0.2579	0.1824	-0.1120
0.850	0.2739	-0.2293	0.1581	-0.0949
0.900	0.2510	-0.2031	0.1364	-0.0803
0.950	0.2288	-0.1791	0.1173	-0.0677
1.000	0.2076	-0.1573	0.1005	-0.0568
1.050	0.1873	-0.1376	0.0857	-0.0476
1.100	0.1682	-0.1198	0.0729	-0.0396

(forts)

Värden för $f_0(u)$, $f_1(u)$ och $f_2(u)$ (forts)

u	$\frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot e^{-u^2}$	$f_0(u)$	$f_1(u)$	$f_2(u)$
1.150	0.1503	-0.1039	0.0617	0.0329
1.200	0.1337	-0.0897	0.0520	0.0273
1.250	0.1183	-0.0771	0.0438	0.0224
1.300	0.1041	-0.0660	0.0366	-0.0184
1.350	0.0912	-0.0562	0.0307	-0.0148
1.400	0.0795	-0.0477	0.0253	-0.0122
1.450	0.0689	-0.0403	0.0209	-0.0100
1.500	0.0595	-0.0339	0.0172	-0.0081
1.600	0.0436	-0.0237	0.0114	-0.0055
1.700	0.0314	-0.0162	0.0076	-0.0032
1.800	0.0221	-0.0109	0.0050	-0.0020
1.900	0.0153	-0.0072	0.0031	-0.0012
2.000	0.0103	-0.0047	0.0020	-0.0007
2.100	0.0069	-0.0030	0.0012	-0.0005
2.200	0.0045	-0.0019	0.0007	-0.0003
2.300	0.0028	-0.0011	0.0005	-0.0001
2.400	0.0018	-0.0007	0.0003	-
2.500	0.0011	-0.0004	0.0002	-

Från "Drainage principles and applications", 2:a uppl., vol. II, s. 205. - International Institute for Land Reclamation and Improvement (ILRI), Wageningen. Publication 16(1979):II.

Stora Hästnäs

Stora Hästnäs ligger på Gotland, några km norr om Visby. Av ägorna ligger ca 16 ha (fig. B3:1) inom ett mojordsområde som underlagras av lera på någon - några meters djup. I figur B3:2 redovisas kornstorleksfördelningen för en profil inom St. Hästnäs ägor. Som synes är inslaget av grovmo mycket stort.

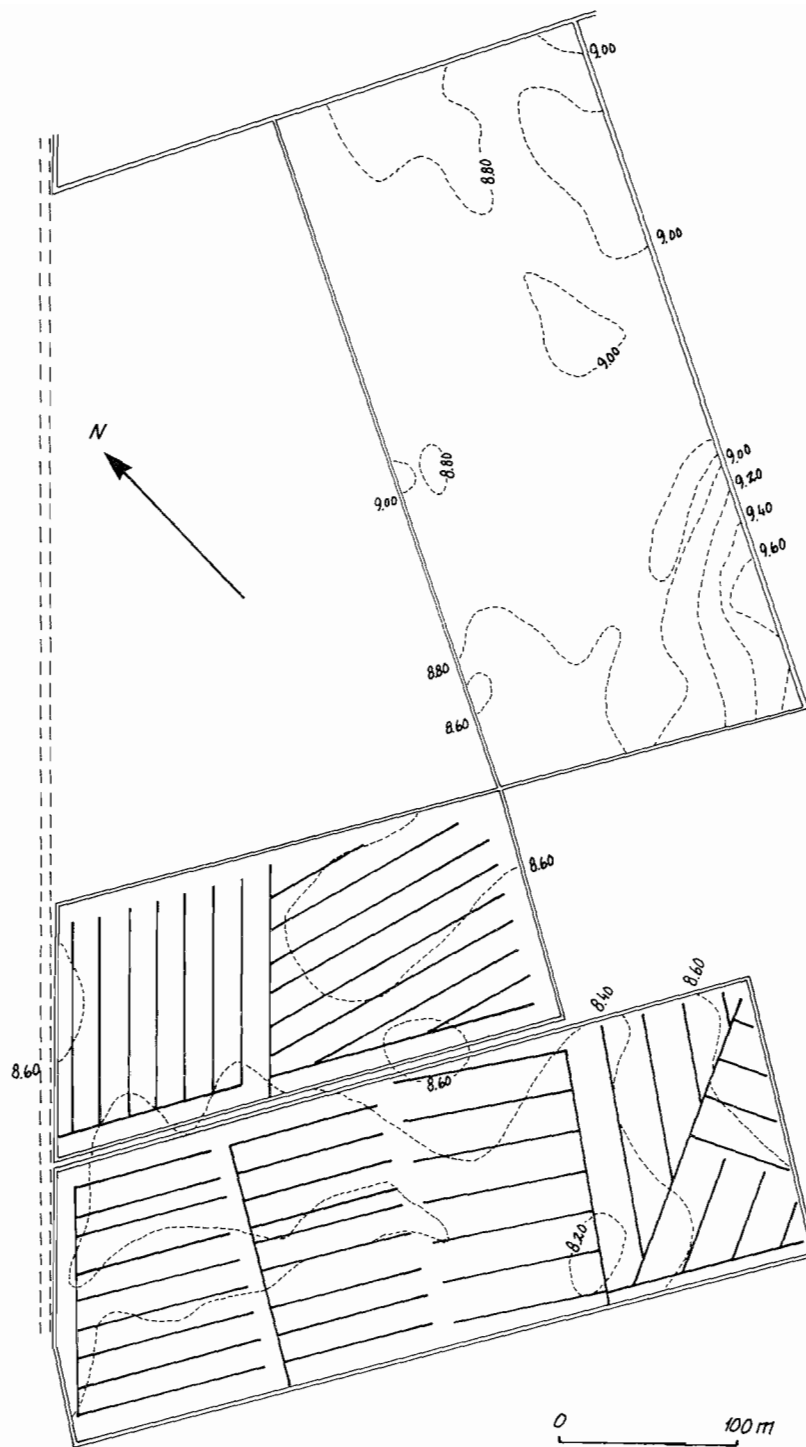
Jorden har ringa vattenhållande förmåga och rotutvecklingen sker så gott som uteslutande i matjorden. Därför har hela området under lång tid ansetts som mindre odlingsvärt och har främst använts för extensiv vallodling.

Efter att ha täckdikats ca 10 ha under 1980 och 1981, har brukaren underbevattnat denna area under 1982 och 1983. Resultatet har varit så bra att återstående 6 ha av ägorna i området också kommer att täckdikas.

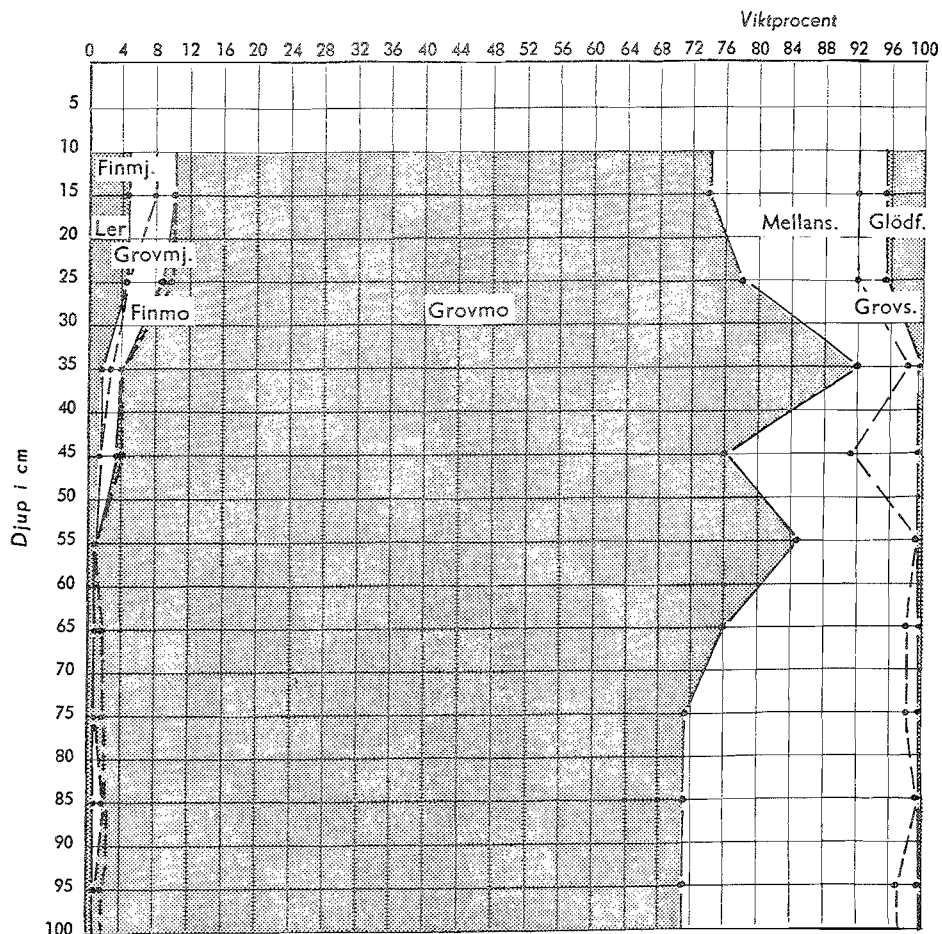
Innan täckdikningen påbörjades, blev Avdelningen för hydroteknik tillfrågad om möjligheterna att underbevattna marken i fråga. Efter omfattande fält- och laboratorieundersökningar kunde det konstateras att förutsättningarna för underbevattning var relativt goda på den aktuella lokalen. Vid undersökningarna fastställdes att ett k-värde på 3-4 m/dygn var lämpligt som beräkningsunderlag. Grundvattenytans optimala läge (fastställd på omlagrade prover) befanns vara ca 0,4 m under markytan (Heivall, 1980).

Av det som idag är täckdikats, är 3 ha dikats med varierande ledningsavstånd (10, 15 och 20 m; se fig. B3:1) så att betydelsen av olika dikesintensitet kan iakttas. Under 1982 och 1983 har grundvattenytans rörelser studerats vid både 10 och 20 m dikesavstånd. Höjning och sänkning går naturligtvis snabbare med det mindre avståndet, men för båda avstånden har grundvattenytan varit nära nog plan mellan ledningarna även vid det snabbaste förloppet (sänkning av vattenståndet med 0,45 resp. 0,25 m inom ett dygn). Detta innebär att vid de strömningshastigheter som är aktuella under den stationära bevattningsfasen, kommer grundvattendepressionen mitt emellan ledningarna att bli endast några cm vid 20 m ledningsavstånd.

Som framgår av kartan (fig. B3:1) är det relativt stora höjdskillnader inom de fält som nu är täckdikade. I södra hörnet stiger marken 0,6 m på 100 m. Topografin är alltså inte idealisk för underbevattning. Om man skulle följa de rekommendationer som givits tidigare i föreliggande skrift, borde en uppdelning i delsystem med olika vattenstånd ha skett. Detta var också meningen från början, men när det täckdikade området underbevattnades för första gången 1982 fanns ännu inga dämningpunkter. Brukaren ställde då grundvattnet på ett medelavstånd av 0,5 m från markytan. Därefter höjdes grundvattnet till denna nivå en gång per vecka. På fälten odlades potatis och sockerbetor. Betskörden blev hela 60 ton/ha. Någon direkt mätning av potatisskörden gjordes inte, men den bedömdes rent subjektivt som god.



Figur B3:1. De underbevattnade fälten på St. Hästnäs.
Subirrigated fields at St Hästnäs.



Figur B3:2. Kornstorleksfördelning på de underbevattnade fälten på St. Hästnäs.
Particle size distribution of the subirrigated fields. (Grovmo = fine sand).

Under 1983 skedde bevattningen på samma sätt som året före. Vattnet tog dock slut under senare delen av augusti. Inom de högst belägna delarna började torksymptom uppträda innan regn kom i mitten av september. Trots frost vid midsommar och ovan nämnda vattenbrist, bedömdes potatisskörden som god och sockerbetorna gav även detta år ca 60 ton/ha. Under 1983 odlades även 0,5 ha isbergssallad vilken blev skördeklar tio dagar tidigare än beräknat.

Skörderesultaten tyder på att rötternas tillgång såväl till vatten som syre på denna mark är tillräcklig inom ett betydligt större vattenståndsintervall än vad Heiwalls (1980) undersökningar på omlagrad jord gav vid handen.

Förteckning över utgivna häften i publikationsserien

SVERIGES LANTBRUKSUNIVERSITET, UPPSALA. INSTITUTIONEN FÖR MARKVETENSKAP.
AVDELNINGEN FÖR LANTBRUKETS HYDROTEKNIK. RAPPORTER.

- 104 Andersson, S. & Wiklert, P. 1977. Studier av markprofiler i svenska åkerjordar. En faktasammanställning. Del II. Norrbottens, Västerbottens, Västernorrlands och Jämtlands län. 98 s.
- 105 Andersson, S. & Wiklert, P. 1977. Studier av markprofiler i svenska åkerjordar. En faktasammanställning. Del III. Gävleborgs, Kopparbergs och Värmlands län. 89 s.
- 106 Andersson, S. & Wiklert, P. 1977. Studier av markprofiler i svenska åkerjordar. En faktasammanställning. Del IV. Älvsborgs och Göteborgs- och Bohus län. 72 s.
- 107 Jonsson, E. 1977. Bevattning med förorenat vatten. Hygieniska risker för människor och djur. En litteraturstudie. 30 s.
- 108 Berglund, G., Håkansson, A. & Eriksson, J. 1978. Om dikningsintensiteten vid dränering av åkerjord. Resultat av fältförsök med olika dikesavstånd. IX: Västernorrlands, Jämtlands, Västerbottens och Norrbottens län. 104 s.
- 109 Bjerketorp, A. & Klingspor, P. 1978 (1982). Inventering av avrinningen inom regioner med stor jordbruksbevattning. Faktaredovisning. 1: Kalmar län. 66 s. (109a. Korrigerat nytryck 1982. 66 s.).
- 110 Lundegrén, J. & Nilsson, S. 1978. Bevattningssamverkan. Förutsättningar och olika associationsformer. 27 s.
- 111 Berglund, G. m.fl. 1978. Resultat av 1977 års fältförsök avseende täckdikning, övrig grundförbättring och bevattning. 98 s.
- 112 Forsling, A. & Borgblad, M. 1978. Konflikten mellan jordbruket och naturvården i markavvattningsfrågor. 58 s.
- 113 Linnér, H. 1978. Vatten- och kvävehushållningen vid bevattning av en sandjord. 16 s.
- 114 Ingvarsson, A. 1978. Bevattningsförsök inom trädgårdsområdet i Norden. Sammanfattning av försöksresultat publicerade t.o.m. 1977/78.
- 115 Ingvarsson, A. 1978. Bevattning i fältmässig trädgårdsodling - Teknik och ekonomi. 45 s.
- 116 Berglund, G. 1978. Frosthävningens inverkan på dräneringsledningar. 59 s.
- 117 Berglund, G. 1979. De odlade jordarna i Uppsala län, deras geografiska fördelning och fördelning på jordarter. 42 s.
- 118 Berglund, G. m.fl. 1979. Resultat av 1978 års fältförsök avseende täckdikning, övrig grundförbättring och bevattning. 98 s.
- 119 Valegård, A. & Persson, R. 1981. Optimering av större ledningssystem för bevattning. 49 s.
- 120 Berglund, G. m.fl. 1980. Resultat av 1979 års fältförsök avseende täckdikning, övrig grundförbättring och bevattning. 93 s.
- 121A Bjerketorp, A. 1982. Inventering av avrinningen inom regioner med stor jordbruksbevattning. 2A: Deskriptiv behandling av grunddata från Kristianstads län.
- 121B Bjerketorp, A. 1982. Inventering av avrinningen inom regioner med stor jordbruksbevattning. 2B: Resultat och slutsatser avseende Kristianstads län.

- 122 Berglund, G., Håkansson, A. & Eriksson, J. 1980. Om dikningsintensiteten vid dränering av åkerjord. Resultat av fältförsök med olika dikesavstånd. III. Jönköpings, Kronobergs, Kalmar och Gotlands län. 68 s.
- 123 Johansson, W. 1980. Bevattning och kvävegödsling till gräsvall. 83 s.
- 124 Heiwall, H. 1980. Underbevattning. Studier av grödans tillväxt och vattenförbrukning vid olika djup till grundvattenytan på en sandig grovmo. 17 s.
- 125 Berglund, K. 1982. Beskrivning av fem myrjordsprofiler från Gotland. 55 s.
- 126 Eriksson, J. 1982. Markpackning och rotmiljö. Packningsbenägenheten hos svenska åkerjordar. Förändringar i markens funktion orsakade av packning. 138 s.
- 127 Erpenbeck, J.M. 1982. Irrigation Scheduling. A review of techniques and adaptation of the USDA Irrigation Scheduling Computer Program for Swedish conditions. 135 s.
- 128 Berglund, K. & Björck, R. 1982. Om skördeskadorna i Värmlands län 1981.
Linnér, H. 1982. Växtnäringsbevattning.
Eriksson, J. 1982. A field method to check subsurface-drainage efficiency.
- 129 Karlsson, I. 1982. Soil moisture investigation and classification of seven soils in the Mbeya region, Tanzania. 56 s.
- 130 Wiklert, P.† , Andersson, S. & Weidow, B. Bearbetning och publicering: Karlsson, I. & Håkansson, A. 1983. Studier av markprofiler i svenska åkerjordar. En faktsammanställning. Del V. Skaraborgs län. 130 s.
- 131 Wiklert, P.† , Andersson, S. & Weidow, B. Bearbetning och publicering: Karlsson, I. & Håkansson, A. 1983. Studier av markprofiler i svenska åkerjordar. En faktsammanställning. Del VI. Örebro och Västmanlands län. 82 s.
- 132 Wiklert, P.† , Andersson, S. & Weidow, B. Bearbetning och publicering: Karlsson, I. & Håkansson, A. 1983. Studier av markprofiler i svenska åkerjordar. En faktsammanställning. Del I. Ultuna, Uppsala län. 125 s.
- 133 Wiklert, P.† , Andersson, S. & Weidow, B. Bearbetning och publicering: Karlsson, I. & Håkansson, A. 1983. Studier av markprofiler i svenska åkerjordar. En faktsammanställning. Del VII. Uppsala län. 140 s.
- 134 Wiklert, P.† , Andersson, S. & Weidow, B. Bearbetning och publicering: Karlsson, I. & Håkansson, A. 1983. Studier av markprofiler i svenska åkerjordar. En faktsammanställning. Del VIII. Stockholms, Södermanlands och Östergötlands län. 122 s.
- 135 Wiklert, P.† , Andersson, S. & Weidow, B. Bearbetning och publicering: Karlsson, I. & Håkansson, A. 1983. Studier av markprofiler i svenska åkerjordar. En faktsammanställning. Del IX. Hallands, Jönköpings, Kronobergs, Kalmar och Gotlands län. 104 s.
- 136 Wiklert, P.† , Andersson, S. & Weidow, B. Bearbetning och publicering: Karlsson, I. & Håkansson, A. 1983. Studier av markprofiler i svenska åkerjordar. En faktsammanställning. Del X. Malmöhus och Kristianstads län. 116 s.
- 137 Wiklert, P.† , Andersson, S. & Weidow, B. Bearbetning och publicering: Karlsson, I. & Håkansson, A. 1983. Studier av markprofiler i svenska åkerjordar. En faktsammanställning. Del XI. Kristianstads län. 110 s.

- 138 Berglund, G., Huhtasaari, C. & Ingevall, A. 1984. Dränering av jordar med rostproblem. 20 s.
Ingevall, A. 1984. Dränering av tryckvatten. 10 s.
- 139 Persson, R. 1984. Vattenmagasin för bevattning. 57 s.
- 140 Ingevall, A. 1984. Beräkning av lerhalt från vattenhaltsdata. En jämförelse mellan hygroskopicitets- och vissningsgränsdata som underlag för översiktlig jordartsbestämning. 61 s.
- 141 Alinder, S. 1984. Alternativa bevattningsformer. 1. Bevattningsramp. 29 s.
- 142 Linnér, H. 1984. Markfuktighetens inflytande på evapotranspiration, tillväxt, näringsupptagning, avkastning och kvalitet hos potatis (*Solanum Tuberosum* L.). 153 s.
- 143 McAfee, M. 1984. Drainage of Peat Soils. A literature review. 38 s.
- 144 Messing, I. 1985. Inverkan av tung körning på mark vid två tidpunkter under vårperioden. En markfysikalisk studie av en lerjord i Revingehedsområdet. 20 s.
- 145 Jonsson, B. 1985. Organiska och syntetiska fibermaterial som dräneringsfilter. 46 s.
- 146 Eriksson, I., Fabricius, M., Danielsson, E., Hultman, B., Juto, H. och Huhtasaari, C. 1985. De odlade jordarna i Norrbottens och Västerbottens län. 84 s.
- 147 McAfee, M. 1985. The Rise and Fall of Bälinge mossar. 69 s.
- 148 Johansson, W., Gustafsson, E-L., & McAfee, M. Description of physical properties of twelve cultivated soils. 64 s. 1985.
- 149 Kreuger, J. 1986. Kemisk vattenkvalitet vid bevattning. Håkansson, A. & Kreuger, J. 1986. Vägledning för bedömning av kemisk vattenkvalitet vid bevattning. 78 s.
- 150 Alinder, S. 1986. Alternativa bevattningsformer. 2. Reglering av grundvattennivån. 58 s.

Denna serie rapporter utges av Avdelningen för lantbrukets hydroteknik, Sveriges Lantbruksuniversitet, Uppsala. Serien innehåller forsknings- och försöksredogörelser samt andra uppsatser som dedöms vara lämpade för mer allmän spridning. Uppsatser av huvudsakligen internt intresse publiceras i serien Avdelningsmeddelande. Tidigare nummer i rapportserien kan i mån av tillgång levereras från avdelningen.

This series of Reports is produced by the Division of Agricultural Hydrotechnics, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala. The series consists of reports on research and field trials and of articles or papers considered to be of general interest. Articles of mainly internal interest are published in a series of Divisional Communications (Avdelningsmeddelande). Earlier issues in the Report series can be obtained from the Division of Agricultural Hydrotechnics (subject to availability).

DISTRIBUTION:

Sveriges Lantbruksuniversitet
Avdelningen för lantbrukets hydroteknik
750 07 UPPSALA, Sverige
Tel. 018-171165, 171181
