



Institutionen för vattenbyggnad  
Chalmers Tekniska Högskola

Department of Hydraulics  
Chalmers University of Technology

# **ENERGIUTVINNING UR SJÖ - OCH HAVSSEDIMENT**

**En förstudie**

**Torbjörn Svensson  
Erik Degerman  
Bo Jansson  
Staffan Westerlund**

**Report**

**Series B : 19**

**Göteborg 1980**

# ENERGIUTVINNING UR SJÖ- OCH HAVSSEDIMENT

En förstudie.

Torbjörn Svensson

Erik Degerman

Bo Jansson

Staffan Westerlund

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 790547-9  
från Statens råd för byggnadsforskning till  
Institutionen för vattenbyggnad, Chalmers tekniska hög-  
skola, Göteborg

## FÖRORD

Denna rapport skall belysa möjligheterna och problemen med att utnyttja sediment under vatten som värmekälla för värmepumpar. Några tidigare erfarenheter av sådana värmeupptagningssystem synes inte föreligga annat än i mycket blygsam skala. Arbetet har finansierats av Statens råd för byggnadsforskning, BFR.

Rapporten består av fyra huvuddelar med följande författare:

Kap. 2, 3, 4, 9, 10 Teknik, värme- och vatten- omsättning	Civ.ing. Torbjörn Svensson Inst. f. vattenbyggnad Chalmers tekniska högskola 412 96 Göteborg
Kap. 5, 6, 7, 8 Geologiska faktorer	Forskn. ass. Bo Jansson Inst f. geologi Chalmers tekniska högskola 412 96 Göteborg
Kap. 11 Ekologiska effekter	Fiskeriass. Erik Degerman Fiskeriintendentkontoret Box 2566 403 10 Göteborg
Kap. 12 Rättsliga problem	Doc. Staffan Westerlund Juridiska inst. Uppsala universitet Box 512 751 20 Uppsala

Projektledare har varit civ.ing. Torbjörn Svensson.

För inspiration, råd och värdfulla synpunkter tackar vi prof. Anders Sjöberg, inst. för vattenbyggnad, prof. K Gösta Eriksson, inst. för geologi och doc. Rutger Rosenberg, inst. för zoologi, GU.

Göteborg dec. 1979

Torbjörn Svensson

## INNEHÅLLSFÖRTECKNING

	sid.
Ordlista	1
1. Sammanfattning	3
2. Värmepumpsystem	9
2.1 Värmepumpens funktion	10
2.2 Värmebärarkretsen	12
3. Vatten i sjöar och hav som värmekälla - litteratur	15
4. Sedimentvärmesystem	19
4.1 Olika systemlösningar	19
4.2 Stora eller små system	23
4.3 Skillnader mellan sedimentvärmesystem och jordvärmesystem	25
5. Beskrivning av sjöar	27
5.1 Sjöar - utbredning	27
5.2 Insjöarnas djupförhållanden	29
5.3 Befolkningsfördelning i förhållande till sjöar	30
5.4 Sjötyper	32
5.5. Sjötyper med avseende på termisk skiktning	38
6. Sjösedimentens uppbyggnad	39
6.1 Sedimenttyper	42
6.2 Utfällningar	67
6.3 Sedimentens regionala fördelning	71
7. Sedimentationsprinciper	73
7.1 Sedimenttypernas förhållande till omgivningarnas geologiska beskaffenhet	76
7.2 Inverkan av sjöns vegetation	81
7.3 Kulturmarkernas inverkan	81
8. Sedimentens egenskaper	83
8.1 Vattenhalt, densitet, halt av organiskt material	83
8.2 Termiska egenskaper	88
8.3 Inverkan av frysning	91
9. Sjöars hydrologi	93
9.1 Vattenomsättning och isförhållanden	93
9.2 Vattnets rörelser i sedimenten	95
9.3 Naturlig värmeomsättning i sjöar och sjösediment	95

10.	Värmeuttag ur vatten - sediment	102
10.1	Radiell värmeledning genom slangvägg	102
10.2	Radiell värmeledning i oändligt medium	103
10.3	Värmeupptagning med frysning kring slang	104
10.4	Termisk konvektion vid kylning med bottenför- lagda slangar.	106
10.5	Värmeupptagning genom uppumpning av vatten från sedimenten	108
11.	Ekologiska effekter av sedimentvärmeutnyttjande	110
11.1	Sammanfattning	111
11.2	Direkta effekter av ändrad temperatur på flora och fauna	112
11.3	Effekter på organismerna av isbildning i sedimenten	132
11.4	Effekter av ändrad temperatur på organismernas miljö och konsekvenserna för fauna och flora	134
11.5	Toxicitet hos kylvätskan	141
11.6	Effekter på fiskets utövande	141
11.7	Effekter av anläggningsarbete	142
11.8	Kortfattad summering av olika värmesystems effekter på det akvatiska ekosystemet	143
11.9	Referenser	145
12.	Rättsliga problem knutna till sedimentvärmeutvinning	149
12.1	Inledning	150
12.2	Ianspråktagande av mark med mera.	153
12.3	Rätten till utvinning av energi	156
12.4	Sedimentvärmeutvinning och miljörätten	160
12.5	Andra rättsliga frågor	165
12.6	Slutkommentarer	166
12.7	Sammanfattning	167
12.8	Noter	170
13.	Referenser	171
	Bilagor	174
	Appendix - beräkningar.	188

## ORDLISTA

brinekrets	värmebärarkrets, värmeväxlare i form av en sluten cirkulationsledning som tar upp värme från omgivningen
detritus	sönderfallna växt- och djurrester, svävande i havsvatten eller sjövattnen eller avsatta som gyttja. Kan även innehålla finfördelat oorganiskt material. Detritus kan vara autokton eller allokton.
diatomé	kiselalg, mikroskopiska alger med skal av kisel-syra i karakteristisk struktur.
dystrof	(om miljö) med hög halt av humusämnen och med ringa näringstillgång. Anm. Dystroft vatten är mer eller mindre brunaktigt.
epilimnion	överskikt; vattenmassan ovanför språngskiktet i en termiskt skiktad sjö.
eutrof	(om miljö) med rik näringstillgång
förångare	värmeväxlare i värmepumpen i vilken omgivningsvärmets upptas från värmebäraren
humös	( om vatten) med hög halt av humusämnen, jfr dystrof
hypolimnion	underskikt; vattenmassan under språngskiktet i en termiskt skiktad sjö
jordvärme	värmeupptagning från mark m hj a värmepump
järnbakterie	1) ( i vidsträckt bemärkelse) bakterie som kan åstadkomma utfällning av järn, t ex Leptothrix 2) ( i inskränkt bemärkelse) bakterie som kan oxidera $Fe^{2+}$ till $Fe^{3+}$ , t ex Gallionella
konvektion	vattenström som alstras av t ex temperaturskillnader i vattnet
laminär	(om vattenrörelse) jämn, regelbunden
latent värme	värme som frigöres vid fasomvandling, t ex frysning

limonit	mineral bestående av järnhydroxid, järnockra, som ingår i sediment, t ex sjömalm, myrmalm
litoralzon	zon i hav eller sjö sträckande sig från stranden till under gränsen för klorofyllhaltiga växters utbredning
mesotrof	( om miljö) med måttlig näringstillgång
metalimnion	temperatursprångskikt; horisontellt avgränsad vattenmassa i termiskt skiktad sjö med avsevärt högre temperatur vid övre gränssytan än vid undre.
oligotrof	( om miljö) med ringa näringstillgång
permeabilitet	vattengenomsläpplighet
profundalzon	djupområde och bottenområde som bebos endast av heterotrofa organismer
sapropel	ofullständigt nedbrutet organiskt sediment avsatt under anaeroba förhållanden
sublitoral	övergångsområde mellan profundalzonerna och litoralzonerna
turbulent	( om vattenrörelse) oregelbunden
värmebärare	den vätska genom vilken värme upptas från omgivningen till värmepumpen
värmefaktor	förhållandet mellan avgiven energi och drivenergi för en värmepump

## 1. Sammanfattning

Förstudien visar att det är tekniskt möjligt att med olika metoder utvinna värme ur sjöar, havsområden och dess sediment som värmekälla för värmepumpar. Den värme som finns tillgänglig under vinterhalvåret är i grunda sjöar i huvudsak lagrad i sedimenten och kan upptas via en värmeväxlare i form av en kylslang (brinekrets) på botten. Denna naturliga värmeomsättning beror av temperaturen vid botten under sommaren och av sedimentens termiska egenskaper. I grunda områden med lösa, vattenrika sediment uppgår värmeomsättningen till i storleksordningen  $20 \text{ kWh/m}^2$ . Genom frysning kring värmeväxlarslangarna kan en större energimängd utvinnas men frysningen på botten kan, av såväl tekniska (krav på förankringskrafter och upptining) som ekologiska skäl inte drivas för långt. Värmeuttaget genom brinekretsen har beräknats ligga i intervallet 10 till 25 W/m under vintern.

Värmelagring i sedimenten skulle kunna vara möjlig genom att cirkulera uppvärmt vatten genom nedgrävda värmeväxlare (slangar el. dyl.). Sådan uppvärmning av sedimenten kan dock knappast rekommenderas på grund av risken för stora miljöeffekter.

En annan möjlighet att överföra värme från sommaren till vintern med mindre miljöeffekter är att pumpa upp vatten från några meters djup i permeabla sediment. Detta vatten infiltreras vertikalt genom sedimenten och dess temperatur kan ges sex månaders fasförskjutning relativt sjövattnets och således bli högst på vintern då värmebehovet är som störst. Med uttag på sex meters djup kan man ta ut i storleksordningen 80 - 100 W/m med linjeuttag eller 200 - 400 W med punktuttag. Med ökat uttagsdjup ökar värmeuttaget kraftigt.

Inga vetenskapliga studier har veterligen gjorts beträffande värmeupptagning från sediment och vatten med de system som beskrivits. Det saknas också underlag för att bedöma hur stort värmeuttag som maximalt kan göras ur ett enskilt vattenområde. Grundläggande studier av de processer som styr värmeupptagningen är nödvändiga innan en mera noggrann projektering av sedimentvärmeanläggningar



kan göras. Likaså är det nödvändigt att studera den naturliga värmeomsättningen i olika typer av sjöar och sediment. Sådana grundläggande studier omfattar olika hydrologiska, hydrauliska processer, bottensedimentens uppbyggnad och egenskaper samt klimatologiska faktorer.

Förutsättningarna för sedimentvärmeutnyttjande blir beroende av lokala faktorer, främst närhet mellan värmebehovet och en lämplig värmekälla. Projekteringen blir betydligt mera komplicerad än för en förbränningsanläggning i det att den kräver nära samverkan mellan installationskonsulten och "värmekällekonserter" i form av geologisk och hydrologisk expertis. För att få ned projekteringskostnaderna behöver man utveckla lämpliga "prospekteringsmetoder" för värmekällan. Det torde bli lämpligt att inkludera undersökningar av de vattenområden som kan tjäna som värmekällor i den kommunala energiplaneringen för att underlätta för enskilda objekt.

De ekonomiska förutsättningarna för sedimentvärmeanläggningar är på nuvarande stadium knappast meningsfullt att söka utvärdera noggrant. Därtill finns för många osäkra faktorer. I de enskilda fallen blir lokala förutsättningar, såsom avståndet till sjön, vattendjup, vågpåverkan, jordarter och sedimenttyp etc. avgörande. Vidare måste anläggningen som helhet vara optimerad, vilket det ännu saknas underlag för att göra. Det torde också finnas ett betydande utrymme för praktisk, tekniska innovationer när det gäller utformning, utläggning och förankring av slangsystem på botten, vilket påverkar kostnadsbilden.

Man kan jämföra kostnaden för en brinekrets på sjöbotten med motsvarande jordvärmeslinga nedgrävd i mark. Slanglängderna torde bli jämförbara i de båda fallen och kostnaderna för utläggning och förankring i det första fallet behöver knappast bli högre än kostnaderna för nedgrävning i jorden. Systemet med uppumpning av vatten från sedimenten blir i första hand aktuellt för större anläggningar än enfamiljshus. Uttaget kan göras med etablerad brunnsteknik men även andra enkla metoder kan användas. Uppskattningar av tids- och materialåtgång ger vid handen att kostnaderna blir rimliga.

Som slutomdöme kan sägas att värmeupptagning via bottenförlagda brineledningar eller genom vattenuttag ur sediment är tekniskt möjliga och att dessa system även har en rimlig möjlighet att bli ekonomiskt konkurrenskraftiga.

## Geologiska faktorer

Rapporten inleds med en kort beskrivning av sjöarnas utbredning och djupförhållanden samt sjötyper, med avseende på genes och termisk skiktning.

Med anledning av det faktum att ca. 40% av Sveriges befolkning är bosatt i ett "bälte" tvärs över södra mellansverige, har jordvärme-gruppen vid CTH uppmätt närbelägen vattenareal för 19 kommuner inom detta bälte.

Olika sedimenttyper och deras förekomst beskrivs dels efter Gösta Lundqvists modell och dels efter en för Vättern använd modell av Lars Håkansson och Valter Axelsson.

Sedimentens egenskaper karakteriseras främst av dess vattenhalt, organisk halt och densitet. Ökad vattenhalt och organisk halt medför motsvarande minskning av densiteten. Detta medför i de flesta fall att densiteten ökar mot djupet ned till en nivå, någon eller några meters djup, där i stort sett inga densitetsvariationer förekommer. Den laterala densitetsvariationen bestäms ofta av vilka jordarter som omger sjön. Ett grovt material (t ex grus - sand) ger sandiga strandsediment, vilka har låg vattenhalt och organisk halt, vilket medför hög densitet. Finkornigare partiklar, som befinner sig i suspension, sedimenterar där lugna förhållanden råder, vilket ofta innebär sjöns djuppartier. De marina sedimenten har av tidsskäl ej behandlats i denna rapport.

Mycket litet tycks vara gjort angående sjö- och havssedimentens termiska egenskaper. I samband med värmeflödes- och värmebudgetberäkningar i sjöar och hav har dock en mängd värmekonduktivitetsbestämningar på sediment gjorts. Sedimentens sammansättning är dock ej beskrivna, varför dessa mätningar förefaller vara utan större intresse för detta projekt. E Saare och C G Wenner har gjort värmekonduktivitetmätningar på minerogena och organiska jordarter vid varierande vattenhalter. Tyvärr anges ej om jordarten vid högsta angivna vattenhalt är mättad eller ej, varför även dessa mätningar är av mindre intresse för detta projekt.

### Ekologiska effekter

Temperaturen är den viktigaste omvärldsfaktorn för de akvatiska organismerna. Redan ändringar av ett vattenområdes medeltemperatur med en grad kan få vittgående följder för artsammansättningen och individantalet hos akvatiska djur.

Temperaturen påverkar metabolism, hjärtverksamhet, aptit, digestion, tillväxt, aktivitet, reproduktion och migrationsbeteenden hos akvatiska djur. Påverkan är oftast märkbar redan vid små temperaturförändringar. Ytterst påverkar temperaturen ett vattenområdes produktion.

Sålunda kan förutsägas att sedimentvärmeanläggningar kommer att påverka de akvatiska ekosystemen. Blir temperaturhöjningarna i storleksordningen några grader kommer fauna och flora att förändras samtidigt som produktionen ökar. Blir sänkningen av temperaturen i samma storleksordning ändras också organismsammansättningen medan produktionen minskar. En temperatursänkning skulle sålunda ha gynnsam effekt på eutrofierade vattensystem.

Temperaturändringar påverkar förutom produktionen även sedimentens kemi. Återcyklingen av organiskt material, syrenivåer, pH, redoxpotentialen, kretslopp av närsalter, toxicitet och ackumulering av tungmetaller beror intimt av miljöns temperatur.

Effekterna på flora och fauna torde bli större i sötvatten än i saltvatten. Detta beroende av att sötvattnen med sin mindre vattenvolym har en mindre reserv av organismer som kan återkolonisera ett stort område. En utslagning av faunan i limniska system kan lätt bli permanent.

Sedimentvärmesystem borde gå att förena med ett friskt och normalt fungerande akvatiskt ekosystem. För att kunna ge anvisningar om hur detta skall utformas måste en konkret, problemanpassad forskningsinsats göras.

Rättsliga problem knutna till sedimentvärmeutvinning

Särskild lagstiftning för sedimentvärme saknas. Hittillsvarande energilagstiftning har främst gällt vattenkraft, torv, kol, olja, gas, ved och uran men däremot inte vind, sol eller jordvärme. Energilagstiftning finns också för planering. Den sammanlagda energilagstiftningen är dock outvecklad och inte samordnad.

I rapporten undersökes nu gällande lagstiftning för att finna regler, som får betydelse för genomförandet av sedimentvärmeutvinning. Utgångspunkt tas i de skydd som olika intressen har getts i lagstiftning. Innehavare av olika slags "rättigheter" till mark samt miljöskydd, naturvård, planering m.m. hör till de intressen, vars skydd får betydelse.

För att placera en värmeväxlare på mark (inbegripet sjöbotten) krävs medgivande från markägaren. Expropriation är antagligen inte möjlig så som lagstiftningen är för närvarande, främst därför att värmeväxlaren inte bara utnyttjar visst markutrymme (som är den typiska expropriationssituationen) utan också energi i marken, och detta gör att expropriationsanledningarna i 2 kap. expropriationslagen inte täcker sedimentvärmeväxlare.

Däremot kan transportledningarna från värmeväxlaren till förbrukningsställen vanligen läggas på lämplig mark med stöd av ledningsrättslagen. Också pumphus och liknande kan på samma sätt läggas på annans mark tvångsvis.

Ersättning för tvångsvis användning utgår enligt principerna i expropriationslagen.

Sannolikt kommer åtminstone mer omfattande anläggningar i vattenområden att kräva tillstånd som byggande i vatten.

Energi som lagrats i jord, vatten etc. har inte varit föremål för speciell lagstiftning och någon särskild energirätt finns inte i svensk rättstradition. Däremot finns i svensk rätt en mängd andra regler som anger vem som har rätt till energi i olika former. En preliminär bedömning är att, i sådana konkurrenssituationer och intressekonflikter där olika markägare konkurrerar om energin som finns på den enes mark, torde - även om lagstiftning inte finns för dessa situationer - domstolarna döma på det sättet, att var och en råder över energin som finns på dennes mark. Olika skäl för

detta har förts fram i rapporten, där också diskuteras om tänkbara principer för en framtida reglering av rätten till energi från flödande källor.

Naturvårdslagen kräver försiktighet vid alla åtgärder som kan påverka naturmiljön. Samråd krävs med länsstyrelsen om påverkan kan bli allvarlig och länsstyrelsen får kräva begränsningar och andra försiktighetsmått.

Också miljöskyddslagen kan bli tillämplig, eftersom temperaturförändringar i vattenområden sannolikt kommer att behandlas som förorening likställd med utsläpp av kylvatten. Den lagen kan hindra viss placering av en verksamhet samt medför ibland ganska kostsamma försiktighetsmått, i vissa situationer till och med direkt förbud mot verksamheten.

Vätskan i anläggningen innebär att inte bara miljöskyddslagen utan också lagen om hälso- och miljöfarliga varor och hälsovårdsstadgan blir tillämpliga. Detta kommer normalt inte att medföra ytterligare skärpningar för verksamheten (i vissa situationer är det dock möjligt) men innebär att fler myndigheter kan komma in i frågan.

Bland övriga rättsliga frågor kan noteras att ankringsförbud kan behövas och sådant utfärdas av länsstyrelsen enligt sjötrafikförordningen. Intressekonflikter med fiskerättshavare hör främst till miljöfrågorna i föregående avsnitt, men anläggningsarbetenas inverkan bedöms som byggande i vatten av vattendomstol.

## 2. Värmepumpsystem

Med hjälp av värmepumpar kan behovet av primärenergi för uppvärmning av byggnader betydligt minskas och dessa kan komma att få stor betydelse för den framtida energiförsörjningen. Uppvärmningen svarar för i runt tal hälften av Sveriges energiförbrukning. Värmepumpen drivs av mekanisk energi (kompressor) vilken vanligen erhålles från en elektrisk motor men också kan ges av t. ex. en förbränningsmotor. I den totala energibalansen måste verkningsgraden för produktion av denna primärenergi medräknas, vilket medför att besparingen för samhället kan bli mindre än för den enskilde fastighetsägaren. Om t. ex. elkraft produceras i ett oljeeldat kraftverk med verkningsgraden 0,3 och värmepumpen ger en energibesparing i fastigheten av hälften så blir den totala verkningsgraden med avseende på tillförd primärenergi 0,6 vilket är ungefär samma som direkt oljeeldning. Om däremot elenergi erhålles från vattenkraft med verkningsgraden 0,8 och värmepumpen har en värmefaktor av 2 blir den totala verkningsgraden 1,6 medan direkt elvärme får verkningsgraden 0,8. I detta fall blir även den totala energibesparingen avsevärd.

Effektiviteten hos en värmepumpanläggning uttrycks av dess värmefaktor,  $\phi$ , vilken definieras enligt följande:

$$\phi = \frac{\text{Avgiven värmeenergi}}{\text{Tillförd energi}} \quad \dots \quad (1)$$

Definitionen är inte entydig i det att det såväl i avgiven som tillförd energi finns förluster som, beroende på det aktuella systemet, bör tas med eller kan slopas. Viktigt är att skilja på värmepumpens värmefaktor,  $\phi_p$ , och hela systemets värmefaktor,  $\phi_T$ . I den första medräknas enbart kompressorns energibehov medan  $\phi_T$  tar hänsyn till energibehovet hos cirkulationspumpar och annan kringutrustning. Typiska värden på värmefaktorer för jordvärmesystem varierar mellan 2 och 3. Se vidare Kraft, Ferm, Hill (1979).

## 2.1 Värmepumpens funktion

Värmepumpen kan närmast liknas vid ett omvänt kylskåp. Energi upptas vid en låg temperatur och avges vid en hög med en insats av mekanisk energi. Skillnaden består i att i kylskåpet utnyttjas kylningen vid energiupptagning medan värmepumpen utnyttjar den avgivna värmen. Värmeupptagningen kan då ske från uteluft, vatten eller jord eller annan "gratis" energikälla.

För att uppta och avge värmets i värmepumpen utnyttjas det latent värmets vid övergång från flytande form till gasform hos ett lämpligt ämne (R22, R105, ammoniak). Man utnyttjar därvid det förhållande att vätskans kokpunkt varierar med trycket och kan således välja energiupptagnings-temperatur (förångningstemperatur) och energiavgivningstemperatur (kondenseringstemperatur) inom vissa gränser genom att ändra trycket. Värmepumpen får då det principiella utseendet enl. fig. 1.

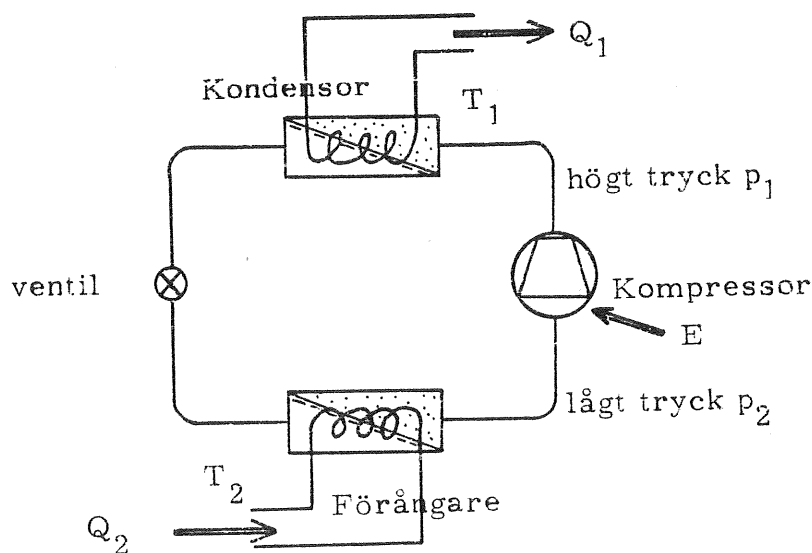


Fig. 1 Principskiss av värmepump

I förångaren (en värmeväxlare) upptas energin  $Q_2$  vid förångningstemperaturen  $T_2$  genom att vätskan kokar. Energin tas från värmekällan (sedimenten) via cirkulerande värmebärare som kan vara vatten, ev. med fryspunktnedsättande tillsats. Man kan också tänka sig att direkt cirkulera grundvatten från värmekällan. Förångaren är vanligen för jordvärme-anläggningar, dimensionerad för en temperatursänkning hos värmebäraren av  $3^{\circ}\text{C}$  och med utgående temperatur  $1-2^{\circ}$  högre än förångningstemperaturen,  $T_2$ .  $T_2$  blir således ca  $5^{\circ}$  lägre än värmekällans temperatur.

I kompressor ökas gasens tryck till  $p$  genom tillförsel av energin  $E$ . Kompressionen sker i stort sett adiabatiskt, dvs. utan värmeutbyte med omgivningen, varvid gasens temperatur stiger. Denna heta, komprimerade gas kyls sedan i kondensorn till kondenseringstemperaturen  $T_1$  vilken är högre än  $T_2$  beroende på det högre trycket. Här övergår ångbildningsvärmets till kylkretsen genom att gasen kondenserar. Energin  $Q_1$  bortledes och användes till uppvärmning och/eller förbrukningsvarmvatten. Slutligen sänks trycket hos vätskan genom en expansionsventil för att denna åter skall kunna ta upp värme vid låg temperatur.

För beräkning av värmepumpens värmefaktor kan jämförelse göras med en Carnotprocess vilken är den teoretiskt sett mest effektiva värmemaskinen. För en sådan gäller:

$$\phi_c = \frac{T_1}{T_1 - T_2} \dots \dots \dots (2)$$

där  $T_1$  och  $T_2$  är i  $^{\circ}\text{K}$ .

För att uppnå en så god effekt som möjligt av en värmepump är det således viktigt att skillnaden mellan kondenserings- och förångningstemperaturen är liten. Tabell 1 visar den teoretiska värmefaktorn för några olika kombinationer av  $T_1$  och  $T_2$ .



$T_2 \backslash T_1$	$40^{\circ}\text{C}$	$50^{\circ}\text{C}$	$60^{\circ}\text{C}$
$-5^{\circ}\text{C}$	7,0	5,9	5,1
$\pm 0$	7,8	6,5	5,6
$+5^{\circ}\text{C}$	8,9	7,2	6,1
$+10^{\circ}\text{C}$	10,4	8,1	6,7

Tabell 1 Den teoretiska (Carnot-)värmefaktorn,  $\phi_c$ , för några kombinationer av förångningstemperatur  $T_2$  och kondenseringstemperatur  $T_1$ .

I praktiken är dock värmefaktorn betydligt lägre, i storleksordningen hälften av  $\phi_c$ . För kylanläggningar har man visat att den praktiska värmefaktorn ökar med kylaggregatets storlek och detta torde också vara fallet för värmepumpar, se

Den energi som avges via kylkretsen (från kondensorn) tas dels från omgivningen,  $Q_2$ , och dels från kompressorn,  $E$ , och det gäller därför:

$$Q_1 = Q_2 + E \dots \dots \dots (3)$$

För ett givet energibehov  $Q_1$  krävs då en tillförsel från värmebärarkretsen motsvarande

$$Q_2 = Q_1 \left( 1 - \frac{1}{\phi_T} \right) \dots \dots \dots (4)$$

Med en värmefaktor tre tas således två tredjedelar av värmebehovet från värmebärarkretsen och en tredjedel från kompressorn.

## 2.2 Värmebärarkretsen (brinekretsen)

Genom värmebärarkretsen upptas värmets från omgivningen, i vårt fall sediment, och avges i förångaren. Vidare kan värme upptas eller avges på transportsträckan mellan värmekälla och värmepump. Dimensionering av värmebärarkretsen är ett optimeringsproblem som, förutom de begränsningar som ges av värmetransport i sedimenten och av värme-

behovet i värmepumpen, innefattar val av värmeväxlare, slangmaterial och slangdimensioner, isolering samt cirkulationspump. Vi skall inte närmare gå in på detta men ge några uppgifter om storleksordningar.

Flödet av värmebärarvätska - vatten med ev. tillsats av fryspunktsned-sättande medel - beror av värmebehov,  $Q_2$ , vätskans densitet,  $\rho$ , och värmekapacitet,  $c$ , samt temperatursänkningen över värmeväxlaren,  $\Delta T$ .

$$Q_2 = \rho c q \cdot \Delta T \quad \dots \quad (5)$$

Vätskeflödet,  $q$ , blir:

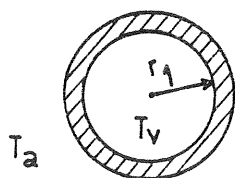
$$q = \frac{Q_2}{\rho c \Delta T} \quad \dots \quad (6)$$

För vatten med temperaturfallet,  $\Delta T = 3^\circ$ , erhålles

$$q = 0,08 \cdot 10^{-6} \cdot Q_2 \quad \dots \quad (7)$$

Med  $Q_2$  i kW och  $q$  i l/min är motsvarande samband,  $q = 4,8 Q_2$ .

Energiflödet genom slangväggen bestämmes av dess k-värde ( $k$  = värmeledningstal/vägg tjocklek), temperaturfallet genom väggen samt av slangens radie,  $r_1$ . För ett tunnväggigt rör erhålles följande värme flöde:



$$Q = 2 \pi r_1 \cdot k (T_v - T_a) \quad \dots \quad (8)$$

Om omgivningstemperaturen,  $T_a$ , antages vara konstant får man följande formel för beräkning av temperaturen inne i slangen:

$$T(x) - T_a = (T(o) - T_a) \cdot e^{-\frac{2 \pi r_1 k}{\rho c q} \cdot x} \quad \dots \quad (9)$$

Denna formel kan användas för att beräkna förlusterna - eller erforderlig isolering - på transportsträckan mellan värmekälla och förbrukning. Den parameter som bestämmer värmeförlusten är  $2\pi r_1 kx\Delta T/Q_2$ , där  $\Delta T$  är temperaturfallet över förångaren. För en given anläggning är alltså energiförlusterna proportionella mot faktorn  $r_1 \cdot k$ .

Som exempel kan vi ta en anläggning med följande data:

$$Q_2 = 10 \text{ kW}, \quad \Delta T = 3^\circ\text{C}, \quad x = 300 \text{ m}, \quad r_1 = 16 \text{ mm}$$

$$k = 200 \text{ (0,4/0,002)}$$

Värmeförlustparametern blir då  $\frac{2\pi \cdot 0,016 \cdot 200 \cdot 300 \cdot 3}{10 \cdot 10^3} = 1,80$ .

Detta motsvarar  $T(x) - T_a / T(o) - T_a = 0,16$  och således en stor relativ temperaturändring. Ledningen måste alltså isoleras. Om man kan tillåta en relativ temperaturändring av 10%, dvs  $T(x) - T_a / T(o) - T_a = 0,9$ , krävs att värmeförlustparametern är mindre än 0,10. Då behövs ett k-värde av

$$k = \frac{0,10 \cdot Q_2}{2\pi r_1 x \Delta T}$$

Med våra siffror erhålles  $k = \frac{0,10 \cdot 10 \cdot 10^3}{2\pi \cdot 0,016 \cdot 300 \cdot 3} = 11$ , vilket motsvarar ca 5 cm vattenmättad isolering.

För dimensionering av värmeväxlaren i sedimenten är emellertid ekv. (9) mindre användbar då omgivningstemperaturen,  $T_a$ , påverkas av värmeuttaget. Tillförseln av värme till slangarna sker här så långsamt att en viss temperatursänkning kring dessa kommer att ske. Detta fall behandlas närmare i kap. 10 .

### 3. Vatten i sjöar och hav som värmekälla - litteraturstudier

Utnyttjande av värmeinnehållet i sjöar och vattendrag har först på senare tid tilldragit sig större intresse. Veterligen har ingen mer omfattande redovisning gjorts av erfarenheter från utförda anläggningar. De studier som är gjorda är av typen förstudier och tar upp en del olika aspekter på problemet.

Inverkan på vintertemperatur och istillväxt av värmeuttag ur en mindre sjö har studerats av Häggkvist (1978). Den sjö som studerats är belägen i Luleåtrakten och tämligen grund (medeldjup 2,7 m) varför den använda beräkningsmodellen förutsätter att sjön är homoterm, dvs. har samma temperatur från ytan till botten. Sjötemperaturen kan då beskrivas med följande differentialekvation, vilken löses stegvis i tiden.

$$\rho C_p \cdot d_m \cdot \frac{dT_m}{dt} = H_{ut} + K(T_e - T_{yt}) \quad (10)$$

där  $\rho$  = vattnets densitet

$C_p$  = vattnets värmekapacitet

$d_m$  = medeldjup

$T_m$  = medeltemperatur

$t$  = tiden

$H_{ut}$  = uttagen värmemängd per  $m^2$

$K$  = koefficient för värmeutbytet med atmosfären

$T_e$  = jämviktstemperatur

$T_{yt}$  = yttemperatur (sättes lika med  $T_m$ )

Värmeutbytet med atmosfären beror på ett komplext sätt av in- och utstrålning, kondensation och avdunstning samt ledning och konvektion. Formler för dessa olika processer ges.

För beräkning av den förändrade istillväxten utgår Häggkvist från den uppmätta naturliga istjockleken,  $d_n$ , och naturliga värmeförluster genom isen pga värmeledning,  $H_n$ . Modellen förutsätter att hela värmeuttaget,  $H_{ut}$ , åtgår till att öka istjockleken. Isens tillväxt kan då skrivas:

$$\frac{d}{dt}(d_{is}) = \frac{1}{\rho_{is} \cdot F} (H_n \frac{d_n}{d_{is}} + H_{ut}) \quad (11)$$

där  $d_{is}$  är istjockleken  
 $\rho_{is}$  är isens densitet  
 $F$  är frysvärmets

Beräkningarna visar att med ett totalt värmeuttag motsvarande  $35 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{år}$  och med maximalt effektuttag  $9,25 \text{ W/m}^2$  under tre månader på vintern ökar maximal istjocklek från 0,7 till 0,9 m. Islossningen förskjuts ca 3 dygn pga den ökade istjockleken. Beräkningen tar ej hänsyn till värmeflödet från sedimenten vilket uppges vara  $2,4 \text{ W/m}^2$ . Beräknad isbildning är därför större än den verkliga.

Författaren drar själv slutsatsen att stora mängder energi kan utnyttjas om frysvärmets tekniskt nyttiggöras. Tekniska och praktiska problem med att placera "isbildande" enheter i sjöar är emellertid ej lösta.

En mera omfattande genomgång av problemställningar i samband med utnyttjande av vatten i sjöar och hav som värmekälla för värmepumpar är gjord av Davin, Nordling och Sandart (1978). I rapporten behandlas temperaturförhållanden i sjöar och hav, förångarkonstruktioner, korrosion och påväxt samt tillämpningar inkl. dimensionering och kostnads-kalkyler.

Författarna finner att temperaturen i sjöar inte säkert överstiger  $+3^\circ\text{C}$  under vintern varför det är svårt att utnyttja konventionella förångare där vattnet pumpas direkt igenom en värmeväxlare. Risken för igenfrysning är uppenbar. Havsvatten däremot är mera gynnsamt dels därför att temperaturen på större djup ( $>20 \text{ m}$  i Kattegatt) vintertid är  $5-6^\circ\text{C}$  och att den höga salthalten ger en fryspunktsnedsättning av  $1-2^\circ\text{C}$  beroende på salthalten. Förångarkonstruktioner med isbildning eller brine-system berörs men utvecklas inte närmare.

För tillämpning av sjö- eller havsvatten som värmekälla anges att uppvärmningsobjektet bör uppfylla följande villkor:

- lokalisering nära sjö eller hav för att minimera kulvertkostnader
- långutnyttjningstid vid jämn belastning för att dra fördel av låga energikostnader

- högt effektbehov sommartid
- temperaturnivåkrav så nära värmekällans som möjligt för att uppnå god värmefaktor

Som anläggningsexempel har räknats på uppvärmning av flerfamiljshus som ligger i anslutning till havet på västkusten. Husen har ett lägsta effektbehov av 15 kW och högsta 65 kW. Årsenergibehovet är 274 kWh. Man har valt att räkna på ett värmepumpsystem av indirekt typ med värmeupptagning ur havsvatten via en mellankrets med plattvärmeväxlare, se bilaga 1. Systemet dimensioneras ekonomiskt enligt gränskostnadsprincipen med tillsatsvärme i form av oljeeldning. Värmepumpen levererar därvid basenergin och tillsatsvärmens kopplas på de värmebehovet är stort. Man antar att värmekällan håller konstant temperatur,  $+6^{\circ}\text{C}$ , och utformar systemet så att temperaturen på avgivet vatten från värmepumpen varierar mellan  $50-60^{\circ}\text{C}$  beroende på utetemperaturen. Årsvärmefaktorn, räknas på kompressorns drivenergi, anges till 4,2, vilket synes vara ett väl högt värde. Med ett energipris av 10 öre/kWh för elenergi till pumpar och kompressor och 9 öre/kWh för oljebaserad tillsatsvärme beräknas slutligen den utbyggbara kulvertlängden för olika storlek på utbyggnadsobjektet. Kulvertlängden svarar då mot största lönsamma avstånd från värmepump (värmebehov) till värmekällan och framgår av följande tabell:

Anläggningsstorlek	0,1	1	10 MW
Antal hus	2	24	240
Producerad energi	656	6565	65 650
Utbyggbar kulvertlängd	0	1,1	7,6 km

En tredje förstudie (Bäckström, 1979) behandlar ett konkret objekt, utbyggnad av turistanläggningen Galax i Olovströms kommun. Författaren finner att temperaturen även i djupa sydsvenska sjöar vintertid är så låg, ibland  $< +2^{\circ}\text{C}$ , att värmeuttag genom kylning av vattnet i en vanlig förångare med genomströmning svårligen kan fås att fungera i praktiken. Ett sådant system skulle man då tvingas stänga av på vintern. Alternativt kan man använda ett indirekt system med kylslingor på botten, varvid värmefaktorn blir lägre. Sådana system uppges ej vara utprovade i prak-

tiken. I båda fallen används olja för att leverera toppeffekt och tre villavärmepumpar för upptagning av sjövärmnet.

En ekonomisk beräkning visar att inget av systemen är lönsamt jämfört med oljeeldning. Därvid har använts ett oljepris av 700 kr/m<sup>3</sup>, elpris 16,5 öre/kWh samt en årskostnad för värmepumpsinvesteringen av 15 %. Skillnaden är dock inte stor och det är uppenbart att vid en ökning av oljepriset i förhållande till elpriset gränsen för lönsamhet snart nås.

Sammanfattningsvis visar de tre förstudierna att:

- o värmeupptagning ur sjövattnen genom kylning direkt i förångaren är praktiskt omöjligt i sötvatten pga att temperaturen vintertid ligger för nära fryspunkten.
- o havsvatten på något djup är bättre i detta avseende men ger problem med korrosion och påväxt.
- o genom isbildning kan avsevärda energimängder tas ut. Teknik för detta finns ej utprovad.
- o studerade anläggningar är på gränsen till att vara lönsamma med dagens energipriser
- o sjövärmeanläggningar är inte praktiskt utprovade varför driftproblem och kostnader är svåra att uppskatta.

#### 4. Sedimentvärmesystem

Förslaget att utnyttja lösa sediment i sjöar, vattendrag och hav som värmekälla för värmepumpar är en vidareutveckling av jordvärme-system och intresset för detta har helt nyligen väckts. Inom den internationella forskningslitteraturen synes inga sådana system finnas beskrivna vilket har framgått vid en datorbaserad litteratursökning på flera internationella databaser som jag låtit göra vid Chalmers tekniska högskolas bibliotek.

##### 4.1 Olika systemlösningar

I detta kapitel skall föras fram ett antal olika, tänkbara systemlösningar för sedimentvärmeutnyttjande. Med sedimentvärmesystem skall förstås sådana system där värmeväxlingen (värmeupptagningen) sker i eller under sedimentytan.

Ett sedimentvärmesystem utnyttjar värmemängder som är bundna i botten-sedimenten av sjöar, vattendrag och hav som värmekälla. Det är emellertid oegentligt att strikt skilja mellan system som får sin energi från sedimenten resp. ovanförliggande vatten då dessa båda värmemagasin står i intimt samband. Ett värmeuttag i vattnet utnyttjar således även en del av den värmemängd som finns lagrad i sedimenten och omvänt påverkar ett värmeuttag i sedimenten den naturliga värmeomsättningen i ovanförliggande vatten. Värmemagasiner i sedimenten mellan årstiderna utgör i själva verket en av de viktigaste faktorerna i sjöars värmebalans under vinterhalvåret, speciellt då under den islagda perioden. Detta beskrivs närmare i kap. 9.2.

Flera anläggningar har kommit till utförande som utnyttjar konventionella jordvärmepumpsystem men med värmebärarslangen lagd på botten av en sjö i stället för nedgrävd i jorden, fig. 2. Av övriga här beskrivna systemlösningar saknas ännu praktiska erfarenheter.

I bilaga <sup>1</sup> redovisas kontakter med värmepumpstillverkare, konsulter och andra som kontaktats för att utröna omfattningen av och erfarenheter från sjöbottenförlagda värmeväxlare. Vi uppskattar att det finns 50 - 100 sådana anläggningar i drift, till övervägande delen av villastorlek. Av dessa har 7 st besökts och beskrivs i bil. 2.



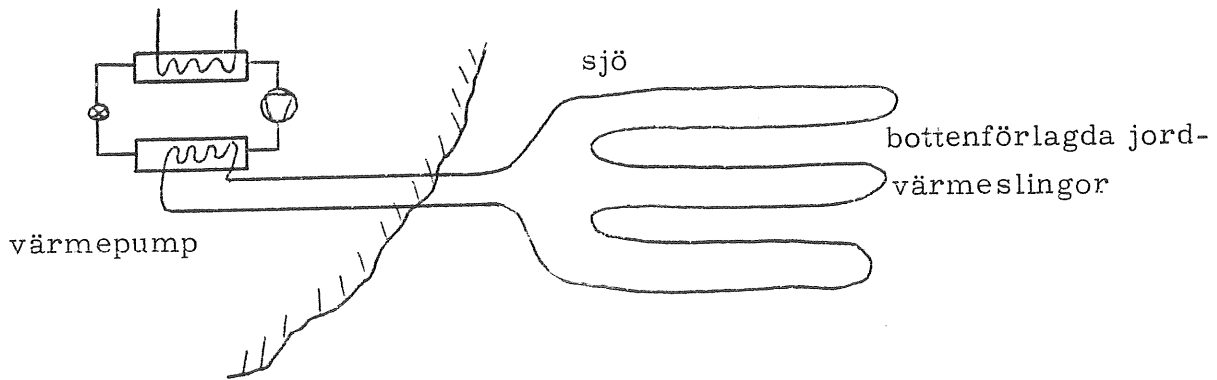
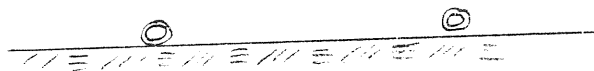


Fig. 2 Värmepumpsystem med brinekrets lagd på sjöbotten.

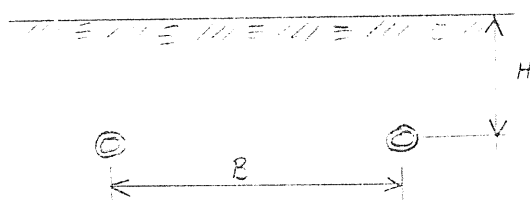
Uttaget av energi ur sedimenten och sjön sker i systemet ovan genom en särskild värmeväxlarkrets, den s.k. brine-kretsen, som vanligen är fylld med vatten blandat med något fryspunktsnedsättande ämne såsom etylen-glykol. Jämfört med direkt pumpning av sjövattnet genom förångaren er-hålles en lägre förångningstemperatur och därigenom lägre värmefaktor. Systemet medger emellertid frysning runt värmeväxlarrören varvid stora mängder latent värme kan tillgodogöras. Den bildade isen måste hinna smälta under sommaruppvärmningen, antingen genom den naturliga värme-transporten från vattnet eller genom att man cirkulerar uppvärmt ytvatten genom rören. Flera olika utformningar är tänkbara, t. ex. följande:

- a) Slang direkt på botten



Värmetransport till slangen genom värmeledning, konvektion, naturliga strömmar och isbildning. Isbildningen måste begränsas pga isens lyft-kraft. Slangarna nedtynges eller förankras vid botten.

- b) Nedgrävt, horisontellt slangsystem

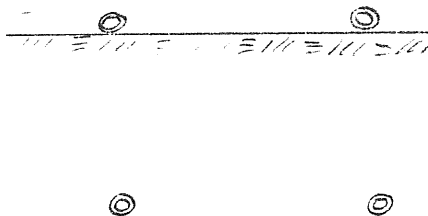


Värmetransport genom ledning och isbildning. Randvillkoret vid sedi-mentytan påverkas av konvektion och strömmar. Konvektionsströmmar

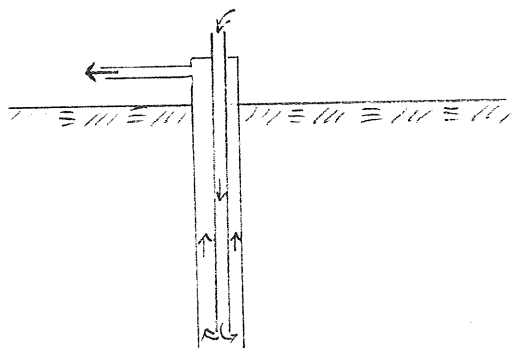
kan också uppstå i sedimenten om dessa är genomsläppliga, vilket kan på-

verka värmetransporten. Ev. is smältes naturligt under sommaren eller genom att pumpa varmt ( $15-20^{\circ}\text{C}$ ) ytvatten genom systemet. Viss värmelagring kan ske genom att värma upp sedimenten ytterligare via slangsystemet. Läggningsdjupet,  $H$ , bör då vara så stort att värmeförlusten inte blir alltför stor.  $H$  bör vara minst i storleksordningen 3-4 m för att värmelagring över året skall vara möjlig. Lämplig teknik för nedläggning av horisontella rör eller slangar i sediment finns ej utvecklad.

- c) Kombination av a) och b). Kan vara aktuellt i samband med värmelagring och värmeuttag vid temperatur  $\pm 0^{\circ}\text{C}$ . Värmeuttaget per ytenhet kan då ökas.



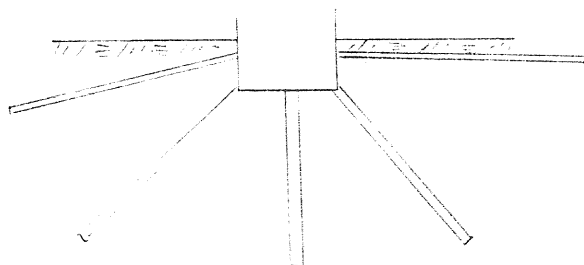
- d) Vertikalt neddrivna rör.



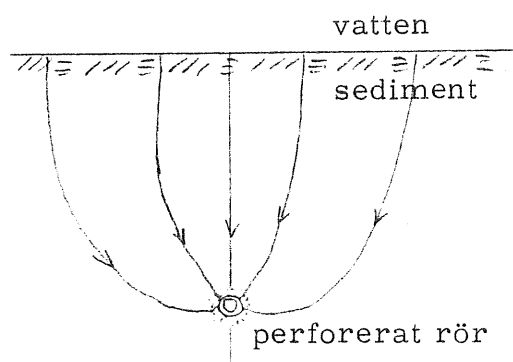
Värmetransport genom värmeledning och isbildning. Rörlängden kan anpassas till sedimentskiktets tjocklek varför stora värmeuttag per ytenhet är möjliga. Isen måste smältas genom cirkulation av uppvärmt

vatten. Värmelagring attraktivt genom att stora, sammanhängande lagringsvolymer kan erhållas.

- e) Solfjäderformigt drivna rör från en brunn. Värmeuttag och värmelagring på samma sätt som d). Vattencirkulationen sommartid kan (kanske) ges av en vågpump, varvid transportkulverten kan användas som värmekälla för tappvarmvatten.

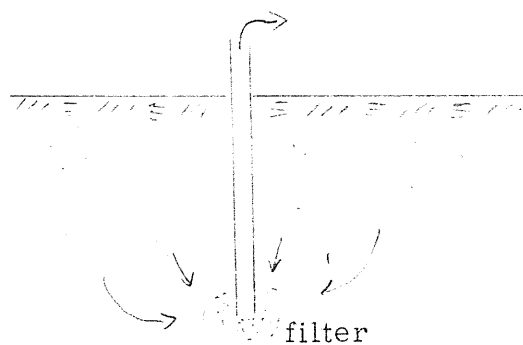


- f) I de fall man har tillgång till genomsläppliga sediment såsom sand, grus eller lösa organiska material av några meters tjocklek kan man tillämpa direkta system och pumpa vatten från sedimenten direkt till värmepumpen. Sådana system kan ge såväl högt utnyttjande per ytenhet som hög värmefaktor om man lagrar sommaruppvärmt vatten på följande sätt:



Vatten pumpas under hela året från röret med ett flöde som motsvarar ca 6 mån transporttid från sedimentytan till röret. Under sommarhalvåret fylls hela strömningssområdet med uppvärmt vatten ( $10 - 20^{\circ}\text{C}$ ) vilket förbrukas

under vintern genom att pumpas genom värmepumpens förångare. Vattnet är då filtrerat och troligen nära syrefritt, vilket medför liten risk för nedsmutsning och korrosion. Systemet kan också utföras med punktuttag genom



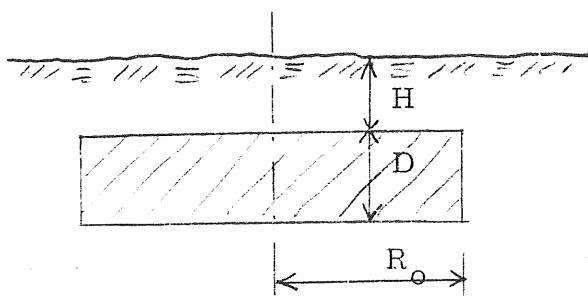
vertikala rör som förses med lämpliga filter vid spetsen. Genom en noggrann utformning torde man kunna erhålla en hög temperatur hos värmekällan under vintern då värmebehovet är störst.

Denna metod har flera fördelar jämfört med indirekta brinesystem. Bland fördelarna kan nämnas högre årsvärmefaktor, inget behov av fryspunktsnedsättande medel, mindre kompressor, mindre effektvariation på elnätet. Teknik för såväl vertikala som horisontella filterbrunnar finns tillgänglig och torde torde även kunna tillämpas under vatten.

#### 4.2 Stora eller små system?

Alla system som utnyttjar värmelagring vid högre temperatur än omgivningen utsätts för värmeförluster under lagringstiden, vilket försämrar dess funktion. För att systemet skall vara användningsbart måste förlusterna  $\phi$  vara små i förhållande till den lagrade värmemängden,  $Q$ . Carlsson, Stymme och Wettermark (1978) anger att för säsongslagring krävs  $\phi/Q < 2 \cdot 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ . Generellt betyder detta att stora lagringsvolymen är att föredra då dessa ger mindre relativa förluster. För sfäriska värmelager i oändligt medium kan man visa att  $\phi/Q = 3 \cdot \lambda / \rho C_p \cdot R_o^{-2}$ , där  $R_o$  är värmelagrets radie. Effektiviteten hos lägret ökar alltså mycket snabbt med radien.

I den mån sediment utnyttjas som värmelager kommer dessa snarare att bli plana än sfäriska. Värmeförlusterna kan då beräknas approximativt enligt följande:



Antag vi har ett värmelager med temperaturen  $T_o$  i form av en cirkulär skiva med radie  $R_o$  och tjocklek  $D$ , lagringsvolymens överyta ligger på djupet  $H$  under sedimentytan.

Den lagrade värmemängden är  $Q = \pi R_o^2 \cdot \rho C_p (T_o - T_\infty)$

Värmeförlusten vid stationärt tillstånd är

$$\phi = \pi R_o^2 \cdot \lambda \cdot \frac{T_o - T_v}{H} + 2\pi R_o \cdot \lambda \cdot (T_o - T_\infty)$$

Värmeförlusten nedåt har beräknats som för ett sfärsikt lager med radien  $R_o$ .

Den relativa värmeförlusten blir:

$$\phi/Q = \frac{1}{D} \cdot \frac{\lambda}{\rho C_p} \left\{ \frac{1}{H} \cdot \frac{T_o - T_v}{T_o - T_\infty} + \frac{2}{R_o} \right\} < 2 \cdot 10^{-8} \quad (12)$$

Om  $R_o$  är stor kan termen  $2/R_o$  försummas varvid erhålles

$$HD > \frac{\lambda}{\rho C_p} \cdot 0,5 \cdot 10^8 \cdot \frac{T_o - T_v}{T_o - T_\infty} \quad (13)$$

Typiska värden på  $\frac{\lambda}{\rho C_p}$  är för lera  $0,22 \cdot 10^{-6}$  och för dybotten  $0,13 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ . Sättes  $T_o = 20^\circ\text{C}$ ,  $T_v = 2^\circ\text{C}$  och  $T_\infty = 7^\circ\text{C}$  får man

$$HD > (6,5 \text{ resp. } 11,0) \cdot 1,4$$

Detta ger för  $D = 1 \text{ m}$  att  $H > 9 \text{ resp. } 15 \text{ m}$   
 för  $D = 3 \text{ m}$   $H > 3 \text{ resp. } 5 \text{ m}$

Om lagrad värmemängd räknas relativt vattnets vintertemperatur,  $T_v$ , skall värdena ovan divideras med faktorn 1,4.

Analysen visar att värmeförlusterna huvudsakligen sker uppåt. Värme-  
 lagret bör ha en radie av minst 10-20 m och vara nedsänkt 5-10 m under  
 sedimentytan. Detta gäller emellertid bara för system där värmen tas  
 ut på samma ställe som den införs. Med system c) kan en stor del av  
 värmeförlusterna nyttiggöras, speciellt i början av säsongen och ett  
 sådant system kan således göras mindre. Samma gäller för system f)  
 där värmeförlusterna genom värmeledning motverkas av ett advektivt  
 värmefflöde mot uttagspunkten.

Slutligen bör påpekas att de system som utnyttjar frysning kring en ned-  
 grävd slang eller rör eller som utnyttjar den naturliga värmeomsättning-  
 en i sediment och ovanliggande vatten inte är beroende av systemets stor-  
 lek. Eventuell is måste emellertid hinna smälta under sommaren, vil-  
 ket innebär att värmeuttaget bör ske på litet djup i sedimenten om  
 upptiningen skall ske naturligt.

#### 4.3 Skillnader mellan ytjordvärme- och sedimentvärmesystem

Konventionell ytjordvärme utnyttjar en brineledning nedgrävd på ca 1 m djup som värmeupptagare. Värmen tillförs dels genom kylning av omgivande mark och dels genom frysning av vattnet i en zon runt ledningen. Genom soluppvärmning sommartid bildas ett värmelager som utnyttjas på vintern.

Sedimentvärmesystem av typ a) eller b) kan sägas vara ytjordvärme under vatten. Viktiga skillnader finns emellertid, vilka har betydelse både för anläggningarnas funktion, dimensionering och utförande och för dess påverkan på omgivningen. I det följande ges några aspekter på de viktigaste skillnaderna.

Sedimentens uppbyggnad och egenskaper är markant olika jämfört med normala markprofiler, se kap. 6. Den viktigaste skillnaden består i att sedimenten alltid är mättade på vatten, vilket ger en hög värmekapacitet. På sedimentationsbottnar är vattenhalten i den översta delen av sedimenten hög, ofta över 90 %, och materialet består i huvudsak av organiska produkter.

Den värmemängd som omsättes i mark eller sediment, och som kan utnyttjas, bestäms av temperaturen vid ytan. Meteorologiska faktorer är därvid avgörande för markytans temperatur medan temperaturen vid sedimentytan även beror av lokala hydrologiska faktorer samt av vattendjupet. En viktig skillnad är också att temperaturen i vattnet ej kan sjunka under  $0^{\circ}\text{C}$  varför sedimenten normalt ej fryser.

I markprofilen sker en avsevärd fuktvandring med vilken stora värmemängder transporteras. Införandet av kallare zoner genom värmeuttag medför att denna fuktvandring påverkas. I sediment har man ej denna komplikation vilket förenklar beräkningarna. I stället kan man här behöva ta hänsyn till termisk konvektion såväl i det fria vattnet ovanför sedimenten som i porvattnet i sedimenten.

Utläggning av en brineledning på botten av en sjö eller något nedgrävd i sedimenten är anläggningstekniskt jämförbart med det grävarbete som behövs för en jordvärmeanläggning om lämplig metodik och utrustning utvecklas. Grundläggande skillnader ligger dock i kravet att en ledning på sjöbotten måste förankras mot lyftning p. g. a. ispåväxt samt mot krafter från vågor och strömmar. Ett isskikt av 5 cm motsvarar en lyftkraft av 2,0 kg/m

och 10 cm ger 5 kg/m. Genom nedgrävning eller nedplöjning av ledningen erhålles direkt den önskade förankringskraften liksom även skydd mot annan mekanisk påverkan, t. ex. genom uppspanning, fiske, dumpning m.m. Med en ledning på botten krävs förankring genom vikter, byglar eller på annat sätt.

Anläggningens påverkan på omgivningen (se kap. 9) blir naturligtvis helt olika i de båda fallen beroende på att helt olika typer av ekosystem berörs. En fundamental skillnad är också att påverkan från ett värmeuttag i mark blir lokal medan värmeuttag i vatten och sediment kommer att påverka ett större område än det där värmeuttaget sker. Detta har juridiska konsekvenser, såväl beträffande värmeuttags tillåtlighet ur miljösynpunkt som beträffande ägorätten till den tillgängliga energin, se kap. 11.

### 5.1 Sjöar - utbredning

Av landets totala areal 449 682 km<sup>2</sup>, upptas närmare 40 000 km<sup>2</sup> eller 8.5 % av sjöyta. Till detta kommer den långa kustlinjen som bidrar med en tillgänglig vattenareal, räknad innanför den sk baslinjen, av nästan samma storleksordning som insjöarealen.

De fyra stora mellansvenska sjöarna, Vänern, Vättern, Mälaren och Hjälmarén, upptar tillsammans en yta av 9074 km<sup>2</sup> eller 24 % av hela sjöarealen. Övriga sjöar med större yta än 100 km<sup>2</sup> är 22 till antalet och har en sammanlagd yta av ungefär 4034 km<sup>2</sup> eller 11 % av sjöarealen.

Antalet sjöar med en yta mellan 100 och 1 km<sup>2</sup> är ca 3900 och har en sammanlagd yta av ungefär 17 300 km<sup>2</sup> eller 46 % av sjöarealen och antalet småsjöar under 1 km<sup>2</sup> är ungefär 80 000 och har tillsammans en yta av 6900 km<sup>2</sup> eller 19 % av sjöarealen.

De stora sjöarna t ex Vänern, Hjälmarén, Mälaren och Siljan ligger i flacka sedimentområden med sjöfattiga omgivningar. Anledningen är att jordytans flacka sänkor är predestinerade för vattensamlingar med stor utbredning.

En småkuperad, välvd terräng däremot ger en orolig hydrografi och många småsjöar.

Vänerns, Vätterns, Hjälmarens och Mälarens sjöfattiga omgivningar övergår på sina håll i en likaledes sjö-



fattig kustzon, vilken i stort sett är bredare och mer markerad i södra Sverige än i Norrland. Gränsen mot sjörikare trakter sammanfaller ibland med HK (högsta kustlinjen), t ex i Halland, delvis i Bohuslän, Blekinge och södra Kalmar län.

I Värmland ligger alla större sjöar nedanför HK. En liknande fördelning finner man i övre Norrland, där de forna havsvikarna numera markeras av mäktiga sedimentterrasser, vilkas ytor är mycket fattiga på sjöar.

Älvarna, särskilt de större, vidgar sig ofta till tämligen stora långsträckta sel- och älvsjöar.

Anmärkningsvärd är fördelningen av sjöarna i Norrbotten, där HK utgör en markerad gräns för ett sjöfattigt område, som är beläget ovanför HK. Antalet myrar är däremot stort.

På de flesta håll råder det dock ej något samband mellan HK och sjöfrekvens.

Det är svårare att se bergarternas än de lösa avlagringarnas inflytande på sjöarnas fördelning. Det förefaller dock som om de kambrosiluriska kalkbergarterna utgjorde en ogynnsam miljö för sjöar delvis på grund av det plana urbergsunderlaget, det prekambriskä peneplanet. Sjöfattigdomen är nämligen utpräglad i Storsjöområdet i Jämtland, på Östgöta- och Närkeslätterna, på Öland och Gotland samt i Skåne.

Lokal sjöfattigdom förekommer här och där i hela landet utan att dess samband med hydrologiska eller geologiska faktorer direkt kan spåras. Sådana fläckvis uppträdande sjöfattiga trakter utan distinkta begränsningar finner man ofta i anslutning till de större älvarna och deras biflöden.

Övergången från sjöfattigt till sjörikt område är stundom abrupt, beroende på t ex markerade terränggränser, men vanligtvis är gränsen flytande. Sjöriikedomen är dock påfallande i områden, där det kala berget dominerar.

De lösa avlagringarnas ytformer och deras betydelse för sjöarnas storlek och fördelning är i regel mer påfallande än sambandet mellan berggrundsytan och sjöfördelningen, och på vissa håll kan man säkert bestämma orsaken till sjökoncentrationerna i morän- eller isälvsavlagringar. Detta gäller särskilt dödisområdena i skilda delar av landet, framför allt i Norrland. (C G Holdar 1957).

## 5.2 Insjöarnas djupförhållanden

Djupförhållandena ansluter sig till omgivande landformer utan någon principiell skillnad mellan de topografiska huvuddragen ovan och under sjöytorna. En allmän erfarenhet är att en sjös största djup vanligen träffas utanför branta stränder. Låga strän-

der fortsätts gärna av grunt vattendjup.

I Skåne påträffas djup mellan 25 och 50 m endast i den mera brutna terrängen mot gränsen till Blekinge. Södra Smålands urbergsslätt har genomgående grunda sjöar. I inre Smålands mera höglänta trakter påträffas större sjödjup. I nordöstra Smålands och södra Östergötlands storbrutna terräng är åtskilliga sjödjup över 50 m uppmätta (Holdar & Sahlström, 1957).

Större delen av landets befolkning är bosatt runt kusterna och i ett "bälte" tvärs över södra mellansverige. Dessa områden sammanfaller i stort med de områden som en gång legat under havsytan, dvs under HK och utgörs till stora delar av sedimentslätter. Dessa områden tillhör således de sjöfattiga delarna av vårt land. Se fig 3.

### 5.3 Befolkningsfördelning i förhållande till sjöar

En översiktlig bild över de geografiska förutsättningarna för att använda sjöar och sediment som värmekälla kan man få genom att jämföra sjöprocentens fördelning med befolkningstätheten, bilaga 2. Man finner här flera områden, t.ex. Östergötland, som har såväl hög sjöprocent som befolkningstäthet.

I samband med en inventering av lera i tätorter, för jordvärmegruppen vid Chalmers tekniska högskola, utförde Peter Wilén en inventering av sjöar och vattendrag i större tätorter i mellansverige och i nära anslutning till dessa.

Som grundmaterial har den topografiska kartan (1:50 000) använts. Detta har medfört, att endast större sjöar och åar kunnat tas med. Vattenytorna har sedan mätts upp med planimeter.

Vid avgränsningen av tätortsområden har inga kommun-



Fig. 3

Karta över havets största utbredning i Skandinavien jämte isobaser för var femtionde meter. På grund av landisens successiva avsmältning — landets blottläggande — är strandlinjen, MG eller HK, icke samtidig utan mycket oliktidig, metakron. Svart = områden täckta av hav; grått = issjöar och större fornsjöar. Ännu oavslutade undersökningar har visat, att större delen av Småland legat under vatten (E. Nilsson).

gränser eller liknande utnyttjats utan, tätorten är inringad godtyckligt med tanke på eventuellt framtida tillväxt. Endast vatten och delar av hela sjöar, som finns inom området, har mätts upp. I vissa fall har hela sjöar tagits med, även då de sträcker sig utanför området. Detta anges då separat. Det är realistiskt att räkna med en felmarginal på ca 10 % på de uppmätta ytorna.

19 tätortsområden har mätts upp och redovisas på nästa sida. Vid flertalet av dessa städer finns stora vatten på nära avstånd, som ej kommit med i uppställningen.

#### 5.4 Sjötyper

I ett geologiskt perspektiv är sjöar tillfälliga företeelser. Liksom andra geomorfologiska objekt kan sjöar sägas genomgå tre utvecklingsstadier - ungdom - mognad - ålderdom. De skapas vanligtvis i samband med någon drastisk geologisk händelse, t ex vulkanutbrott, tektonisk aktivitet eller nedisning. Genom de nedbrytande krafternas verksamhet (vittring, erosion, transport, deposition) utjämnas reliefen, sjöarna mognar och åldras. De flesta svenska sjöarna har påverkats av den senaste istidens väldiga formskapande kraft. Om ingen tektonisk katastrof drabbar det skandinaviska urberget, kommer våra sjöar i sinom tid att fyllas igen och försvinna.

Tabell 2. Vattenarealer inom större svenska tätorter

	<u>total yta (km<sup>2</sup>)</u>	<u>vatten (km<sup>2</sup>)</u>	<u>ung folkmängd</u>
<u>Göteborg</u>	324,1	6,1	500.000
<u>Kungsbacka</u>	11,8	0,28	40.000
<u>Uppsala</u>	67,0	1,2	140.000
<u>Södertälje</u>	40,46	2,1	75.000
Sjön Måsnaren utanför området ca 3 km från centrum, yta 2,94 km <sup>2</sup> .			
<u>Västerås</u>	51,0	8,5	110.000
<u>Eskilstuna</u>	40,18	1,0	90.000
<u>Norrköping</u>	64,74	5,12	120.000
<u>Nyköping</u>	40,0	3,48	60.000
<u>Linköping</u>	58,78	1,06	100.000
<u>Motala</u>	57,76	15,24	50.000
Sjön Boren 28,1 km <sup>2</sup> , ca 2 km från centrum.			
Vättern (Varamoviken och Motalaviken) 20,1 km <sup>2</sup> ca 1 km från centrum.			
<u>Stockholm</u>	910,16	142,9	1 milj.
(sedimentmäktigheten i sund och sjöar i Stockholm anges till minst 10-20 m i beskrivning till jordartskartan Ae 1-4).			
<u>Örebro</u>	90,56	3,0	110.000
<u>Karlskoga</u>	60,86	10,4	35.000
<u>Karlstad</u>	97,06	26,24	70.000
<u>Jönköping-Huskv</u>	129,5	27,0	100.000
<u>Borås</u>	59,76	2,26	100.000
<u>Skövde</u>	80,36	1,4	40.000
<u>Trollhättan- Vänersborg</u>	148,5	20,1	80.000
<u>Uddevalla</u>	44,44	6,5	45.000

284 km<sup>2</sup> ca 3 milj.

× 20 kWh/m<sup>2</sup> =

⇒ 5680 · 10<sup>6</sup> kWh

10 000 kWh/hushåll ⇒ 568000 hushåll × 3 pers ⇒ 1,7 milj.

Hutchinson (1957) har i ett briljant kapitel i sin stora bok "A Treatise on Limnology" behandlat alla tänkbara sjötyper, deras ursprung (genes), utseende och geografiska fördelning på jorden. Han skiljer på 11 huvudsjötyper, som i sin tur indelats i inte mindre än 76 olika undertyper. Hutchinsons genomgång av "The Origin of Lake Basins" upptar hela 163 sidor. I detta sammanhang skall vi endast mycket kortfattat redovisa de 11 huvudsjötyperna:

1. Tektoniska sjöar, 9 olika typfall, varav förkastningssjöarna, t ex Baikalsjön och Tanganyikasjön, utgör den mest kända typen;
2. Vulkaniska sjöar, 10 typfall, varav caldera-sjöar och sjöar skapade genom fördämning av lavaflöde utgör två vanliga typer;
3. Jordskredssjöar, 3 typfall;
4. Glaciala sjöar, 20 typfall;
  - a) Sjöar i direktkontakt med is (3 typer);
  - b) Sjöar utbildade i berggrund som formats av glacial aktivitet, t ex fjordsjöar (4 typer);
  - c) Moränsjöar, t ex sjöar som bildats genom upp-dämning av ändmoräner (4 typer);
  - d) Driftsjöar, t ex dödissjöar och sjöar som utbildats i oregelbunden moränmark (9 typer).
5. Utlösningssjöar, 5 typfall, t ex poljesjöar och sjöar bildade i sänkor formade genom vattenutlösning av kalksten;

6. Fluviala sjöar, 12 typfall;
  - a) Vattenfallsjöar, utbildade genom kavitation nedanför vattenfall;
  - b) Fluviala dammar, t ex deltasjöar och sjöar utbildade bakom leveer (6 typer);
  - c) Meandersjöar, t ex oxbågesjöar (5 typer);
7. Eoliska sjöar, 4 typfall, t ex deflationssjöar och sjöar mellan sanddynor;
8. Kustsjöar, 5 typfall, t ex tomolosjöar och spitssjöar;
9. Organogena sjöar, 3 typfall, t ex korallsjöar och fytogena sjöar;
10. Antropogena sjöar, 3 typfall, t ex regleringsmagasin;
11. Meteoritsjöar, 2 typfall. (Håkansson 1978).

Lundqvist, G (1949) gör en morfologisk uppdelning av sjöar enligt följande:

- 1) Tektoniska bäcken
- 2) Spricksjöar
- 3) Gravsänkor
- 4) Erosionsbäcken
- 5) Dämningsbäcken (åsgropsjöar)



Avgörande för sjöns typ är i första hand omgivningarnas geologiska beskaffenhet. Helt olika inverkar sålunda järnrika urbergsmoräner, kalkmorän, stora lerslätter med rik odlingsbygd, glaciärer som tillför slam osv. Genom markvittring och urlakning kan nämligen de olika näringsämnen transporteras med avrinningsvattnet ut i sjöarna. Sedimenten är emellertid att anse som slutprodukten i sjöns liv. Det råder därför ett intimt samband mellan sjöarnas växt- och djurliv, geologisk typ, vattenbeskaffenhet, m m å ena sidan och sedimenten å den andra (Lundqvist 1949).

Sjöar kan också indelas enligt:

enligt:

eutrof: näringsrika miljöer

oligotrof: näringsfattiga "

mesotrof: mittemellan

Eutrofa sjöar är ofta grunda sjöar med lergrund och har riklig vegetation.

Oligotrofa sjöar är ofta djupa med artfattig vegetation t ex högländssjöar på urbergsgrund.

En dystrof sjö karakteriseras av: brunt vatten, profundala sediment består av dy, sur humus.

Hansen (1962) menar, att dystrofa sjöar skiljer sig fundamentalt från sjöar med klart vatten enligt:

- 1) De innehåller sur humus både i vattnet och i sedimenten.
- 2) Sedimenten är dy, ej gyttja.
- 3) Förhållandet kol/kväve i vattnet och i sedimenten är högre än 10 och ökar med ökat innehåll av sur humus.
- 4) Floran och faunan ändras med ökat innehåll av sur humus.
- 5) Balansen mellan den totala produktionen och konsumtionen av organiskt material är störd. Produktionen är större än konsumtionen, vilket gör att torvbildning kan äga rum.

Den dystrofa sjön kan vara eutrofisk såväl som oligotrofisk. Den dystrofa sjön är ett mellanstadium i utvecklingen till torvmosse.

Skillnaden i flora och fauna mellan dystrofa sjöar och andra är av samma typ som i jordar med sur humus (råhumus) eller med neutral humus (mull).

- 1) sjöar med klart vatten kallas gyttjesjöar
- 2) dystrofa sjöar kallas dysjöar

### 5.5 Sjötyper med avseende på termisk skiktning

Hutchinson (1957) redogör för ett antal sjötyper och benämningar främst med avseende på termisk skiktning.

De typer och benämningar, som är aktuella för svenska sjöar utgörs av:

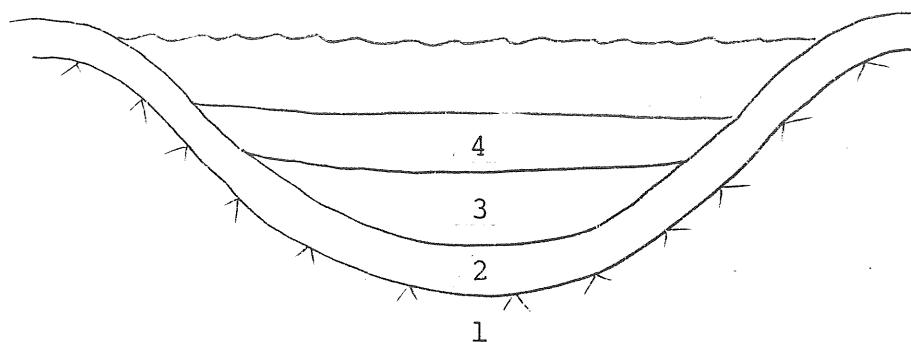
temperate lakes: yttemperatur över 4°C sommartid och under 4°C vintertid. Stor termisk gradient, stora säsongsvariationer, två cirkulationsperioder, en på våren och en på senhösten.

subpolar lakes: yttemperatur över 4°C endast för en kort tid på sommaren, liten termisk gradient, om det existerar en termoklin, är den dåligt utvecklad och vanligen nära ytan, två cirkulationsperioder, vanligen en på försommaren och en tidigt på hösten, temporär avkylning under sommaren kan medföra omblandning.

För att komma ifrån den geografiska anknytningen i ovan nämnda typer kan termen dimictic = sjö med cirkulation två gånger om året, användas. Termen holomictic kan användas om en sjö, vilken kan genomgå flera cirkulationsperioder, innan den övergår till en meromictic sjö, i vilken delar av djupvattnet (monolimnion) stabiliseras av lösta ämnen.

## 6. SJÖSEDIMENTENS UPPBYGGNAD

En sjö är i princip uppbyggd enligt:



1. Fast berg
2. Glaciala jordarter eller sediment (morän, sand etc)
3. Senglaciala sediment (lera, mjäla)
4. Postglaciala sediment (leryttjor, gyttjor, etc)

Den horisontella och vertikala utbredningen av en sjös sediment är emellertid inte så "enkel" som fig.

Sedimenttyp, mäktighet och fördelning är ett resultat av ständigt pågående processer så som erosion, ackumulation, transport, bioturbation, oxidation, reduktion, m m.

Håkansson (1976) presenterar utifrån alla tillgängliga mätdata från Vätterns ytliga sediment en schematisk karta över den dynamiska situationen vid Vätterns bottenyta.

Indelningen i olika dynamiska klasser har gjorts enligt följande principiella mönster:

### 1) Erosionsbottnar.

Därmed avses bottnar som domineras av erosionsprocesser. Det gäller framför allt stränder och områden med sådant litet vattendjup att framför allt vindgenererade vågor kan initiera erosion av finmaterial (mjäla, lera).

För en utförligare teoretisk behandling hänvisas till Norrman (1964).

Erosionen behöver således inte vara konstant, utan det är tillräckligt att erosion förekommer, för att botten skall benämnas erosionsbotten. Materialet i ytsedimenten utgöres av konsoliderade leror med en vattenhalt av ca 50 % eller mindre eller grovmaterial (mo-sand-grus). Dessa områden har i den botten-dynamiska kartan, figur 31 betecknats (-).

### 2) Transportbottnar.

Beteckningen avser områden med såväl aktiv som passiv transport. Med aktiv transport menas då botten-transport av finmaterial, inducerad av vattenrörelse, och med passiv transport avses t ex omlagringsprocesser på sluttande bottnar. Transportbottnar är således bottnar med diskontinuerlig deposition av finmaterial. Typen betecknas (→).

### 3) Ackumulationsbottnar.

Detta är områden med kontinuerlig finmaterialdeposition. Materialet är löst, med en vattenhalt i ytsedimenten (0-1 cm) av ca 75 % eller mer. Det depone-

rade materialet blir kvar och transporteras inte vidare. Genom pålagring konsolideras sedimenten och en lagerföljd kan byggas upp, vari även omlagrat material kan ingå. I figur 4 har bottentypen betecknats (+).

4) Nolltillväxtbottnar i ackumulationsområden.

Denna typ återfinns dels nord-ost Visingsö, dels väster om Motalabukten. Materialtillgången är ringa, och det material, som skulle ha kunnat deponeras, förs bort av

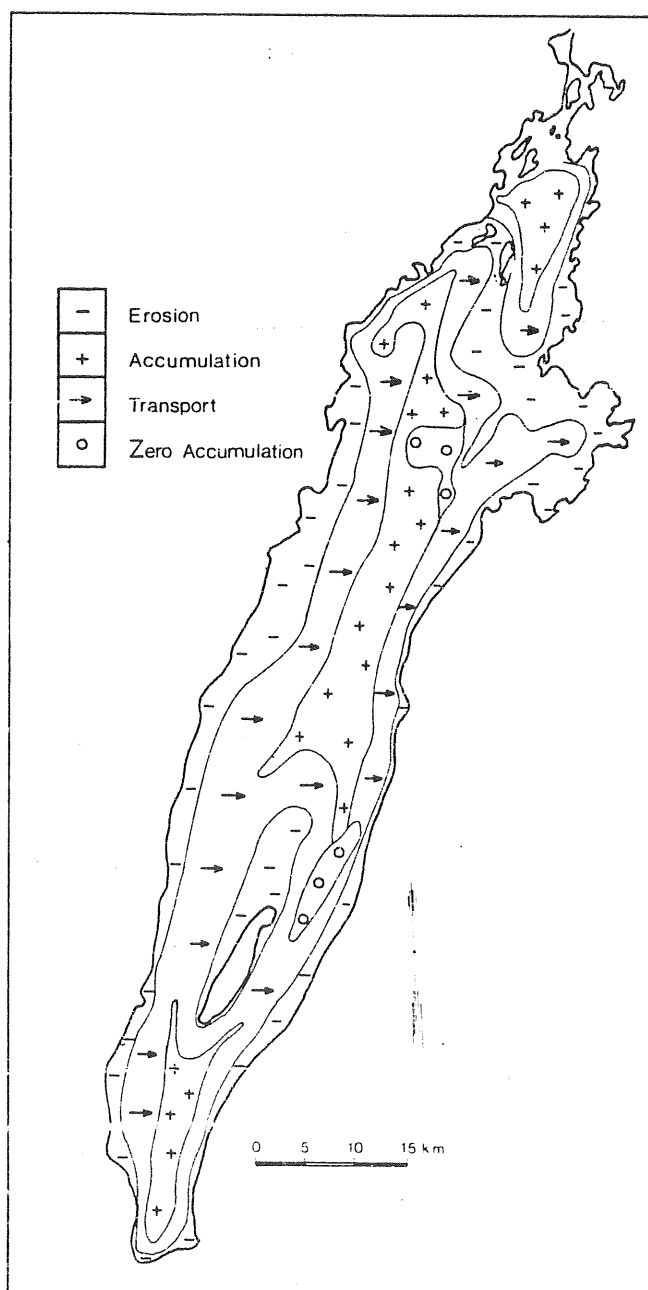


Fig. 4. Bottendynamisk karta över Vättern.  
Dynamic bottom types in Lake Vättern.

vattenströmmar och sedimenterar annorstädes.

Bottentypen torde vara ovanlig. Den förutsätter

a) liten autokton produktion, b) liten allohton tillförsel, c) förhållandevis stort vattendjup, d) förhållandevis energirik vattenmiljö med snabb och relativt konstant vattencirkulation.

Alla dessa förutsättningar finns i de aktuella områdena i Vättern.

### 6.1 Sedimenttyper

För närvarande existerar inte något allmänt accepterat och använt klassificeringssystem för sjösediment. Termer och tolkningar varierar med undersökningarnas målsättning och arbetsmetodik.

I Sverige har klassificeringsproblematiken tagits upp till diskussion under 1972 och 1973 års sedimentsymposier på Askö. En arbetsgrupp har tillsatts under docent Rolf Hallberg, Stockholms Universitet. (Håkansson 1976).

Håkansson (1976) redovisar ett sedimentklassificeringssystem, som har tillämpats för Vätterns sediment, som är uppbyggt enligt:















- 1) Grå till mörkgrå finsedimenten.

Dessa recenta finsediment förekommer huvudsakligen i södra Vätterns djuppartier. Norrman och Königsson

(1972) använder för denna sedimenttyp benämningarna "grey homogeneous silt" och "silty mud-gyttja" och Ekman (1914) delar upp typen på kitingyttja och fingyttja. Dessa är de enda postglaciala sediment av större mäktighet över 1.5 m. Att dessa lager byggs upp beror dels på den förhållandevis goda tillgången av alloktont material och dels på det areellt begrän-

Tabell 3. Ytsedimenten i Vättern (0-max 25 cm).

The surficial sediments of Lake Vättern (from 0 to max 25 cm).

Beteckning Code	Benämning Name	Vattenhalt Water content	Organisk halt Organic content
	Grå till mörkgrå finsediment Grey to dark grey fine sediments	74.1 n=33,s=8.0	9.6 n=33,s=4.3
	Ljusgrå finsediment Light grey fine sediments	73.2 n=19,s=7.2	7.0 n=19,s=1.2
	Bruna till mörkbruna finsediment Brown to dark brown fine sediments	81,7 n=32,s=7.0	9.2 n=32,s=2.2
	Ljusbruna finsediment Light brown fine sediments	52.8 n=20,s=3.9	3.4 n=20,s=1.1
	Svarta finsediment Black fine sediments	66.6 n=5	5.6 n=5
	Grå striade finsediment Grey fine sediments, with striae	79.0 n=4	8.6 n=4
	Bruna striade finsediment Brown fine sediments, with striae	57.7 n=10,s=7.8	4.4 n=10,s=2.1
	Svarta fibersediment Black sediments with fibre	86.1 n=3	32.9 n=3
	Röda-bruna-svarta relativt konsoliderade finsediment Red-brown-black consolidated fine sediments	67.1 n=10,s=4.3	7.1 n=10,s=2.3
	Grovsediment (mo-sand) Coarse sediments	27.7 n=17,s=9.3	1.8 n=17,s=1.7
	Grovsediment (sand-grus) Coarse sediments (sand-pebbles)	20.8 n=7	0.5 n=7
	Bruna till mörkbruna grövre finsediment Brown to dark brown coarser fine sediments	46.9 n=20,s=13.0	3.7 n=20,s=3.1
	Ljusbruna grövre finsediment Light brown coarser fine sediments	40.0 n=24,s=11.7	3.5 n=24,s=2.6
	Inget prov erhållet (No sample obtained)	n=5	

Grövre finsediment betyder att det finns ett markant inslag av mo/sand.  
Coarser fine sediments imply that there is a significant content of sand.

Vattenhalten (i % vs) och organiska halten (i % ts) är angivna som medelvärden.

The water content (% wet substance) and the organic content (% dry substance) are given as means.

n = antalet värden (number of analyses), s = standardavvikelsen (the standard deviation)



sade depositionsområdet. Kvoten nederbördsområde/  
depositionsområde är således relativt hög för de delar  
av Vätterns totala tillrinningsområde, som ger  
upphov till den aktuella sedimenttypen. Dessa fin-  
sediment innehåller också mer organiskt material  
än andra finsediment i sjön, fibersedimenten undan-  
tagna. Vidare är kontamineringsgraden, speciellt i  
närheten av Jönköping-Huskvarna, förhållandevis stor.  
Detta område med stor föroreningsbelastning, t ex  
av kvicksilver, sammanfaller delvis med utbrednings-  
området för fiskfångstplatser. Ett förhållande som  
medför att speciell uppmärksamhet bör riktas mot  
stationära fiskarter fångade i området. För övriga  
områden i Vättern gäller annars, att såväl lekomyråden  
som fångstplatser i stort sammanfaller med bottnar  
där erosions- och transportprocesserna dominerar.

De grå till mörkgrå finsedimenten är ofta överlagrade  
av ett tunt (max 4-5 mm) mycket löst brunt sediment-  
lager. Genom att alla sedimentprover från söder och  
mellersta Vättern tagits med bottenhuggare har detta  
mycket lösa bruna ytsedimentskikt blivit stört.

Avgörande för utseendet av de grå till mörkgrå fin-  
sedimenten i södra Vättern torde vara påverkan av ut-  
släpp från de urbana områdena och från jordbruket.  
Lundqvist (1942a) benämner FeS-rika gråblå till svarta  
sediment för sapropel. Sapropelsediment är ytterst  
finkorniga, strukturlösa, vällingartade och igenkänns  
på sin svavelvätelukt. De grå till mörkgrå finsedi-  
menten företer inte alla sapropeltecknen, utan bör

snarare betraktas som ett övergångsstadium mellan friska, naturliga sediment och antropogena sapropel-sediment, jfr kapitel 7.4.12.

Sapropelbildningen är dessutom mera typisk för eutrofa sjöar. I mer näringsfattiga sjöar begränsas sapropelsedimentens utbredning till djuphålor.

De svarta finsedimenten som förekommer i Vättern kan vara tillfälliga sapropelbildningar (se vidare under denna sedimenttyp).

Vattenhalten i de grå till mörkgrå finsedimenten är i medeltal 74.1 %. Genom pålagring och komprimering avtar vattenhalten och ökar tätheten med ökat sedimentdjup.

För motsvarande sediment i Ekoln fann Axelsson och Håkansson (1972), att tätheten ökade enligt ekvationen

$$\rho = 0.10 \log x + 1.12 \quad (14)$$

där  $\rho$  = täthet i  $\text{g/cm}^3$

$x$  = sedimentdjup i cm

Formeln (14) innebär, att tätheten ökar från ca 1.1 till ca 1.2 i den översta decimeterns sediment. Därefter går ökningen långsammare, till ca 1.3-1.4 på 2 m sedimentnivå.

Även organiska halten förändras med sedimentdjupet genom bl a mineraliseringsprocesserna. Den genomsnitt-

liga organiska halten i ytsedimenten (0-1 cm), för de grå till mörkgrå finsedimenten, är 13.8 %. På nivån 5-6 cm har halten sjunkit till 5.5 % i genomsnitt.

Det skall också anföras, att den sedimentbeskrivning, som presenterats av Axelsson och Håkansson (1973) för södra Vättern i stort legat till grund för denna sedimentindelning. Genom att materialet nu utökats till att gälla hela sjön har det dock blivit nödvändigt att göra ett fåtal korrigeringar vad gäller denna indelning.

## 2) Ljusgrå finsedimenten.

Denna sedimenttyp förekommer inte som ytsediment. Den är homogen till sin karaktär och har en vattenhalt av i genomsnitt 73.2 %. Organiska halten är i medeltal 7.0 % och spridningen är förhållandevis liten. Sedimenttypen liknar i hög grad den av Ignatius et al. (1968) beskrivna typen "grey homogeneous clay" som avsattes i Östersjön under sen Ancylostid. De ljusgrå finsedimenten har en kvicksilverhalt av 15-40 ng/gts, vilket bör betraktas som naturligt.

Vanligtvis överlagras dessa sediment av antingen först ett 5-10 mm tjockt skikt av de relativt konsoliderade finsedimenten samt ovanpå dessa ett, upp till 5 cm tjockt, lager av de bruna till mörkbruna finsedimenten eller ett upp till 10 cm tjockt lager av de grå striade finsedimenten. Överlagringen är mäktigast i områden med ständig ackumulation, men även i transportbottenområden, där den genomsnittliga depositionen

är låg eller obefintlig, överlagras de ljusgrå finsedimenten av annat material.

För närvarande kan inget bestämt anges angående sedimentens ålder eller storstilade utbredning i Vättern. Eftersom sedimenttypen företer flera likheter med den grå homogena Östersjöleran torde den dock vara avsatt före ca 7 000 f Kr. Denna tidsgräns diskuteras dock f n (Uppsalasymposiet, 1974).

Den ljusare färgen, jämfört med t ex de föregående sedimenten, är sannolikt beroende på framför allt en lägre organisk halt men också på en syrerikare depositions miljö.

Genom sin ålder, sitt läge i lagerföljden och sin låga kontaminering har dessa sediment ett sekundärt intresse i miljöforskningssammanhang. Detta kan däremot inte sägas om den kommande sedimenttypen.

### 3) Bruna till mörkbruna finsedimenten.

Denna sedimenttyp dominerar de översta sedimentlagren i mellersta och norra Vättern. Sedimenten förekommer endast som ytsediment och med en maximal tjocklek av ca 5 cm. Vanligen är dock lagret endast 1-3 cm. Sedimenttypen återfinns endast i djuppartier och framför allt i områden med ständig ackumulation. Den genomsnittliga organiska halten på nivån 0-1 cm är 9.2 %, vilket är signifikant lägre än de 13.8 % som förefanns i södra Vätterns grå finsediment.

De bruna till mörkbruna finsedimenten innehåller inom vissa områden förhållandevis mycket tungmetaller och andra föroreningar. Speciellt gäller detta djuphålan norr om Stora Röknen, där höga halter av bl a Hg, Pb och V samt närsalterna N och P erhållits. Vidare finns ett område med förhöjd Cu-halt utanför Karlsborg.

Vattenhalten är i genomsnitt 81.7 %. Sedimenten kan sägas vara typiska för de rådande förhållandena dvs: oligotroft vatten, låg sedimentation och förhållandevis syrerik miljö.

Även om sedimenten i begränsade områden innehåller förhöjda halter av olika s k miljögifter, kan de betraktas som förhållandevis okontaminerade.

#### 4) Ljusbruna finsedimenten.

Med denna sedimenttyp avses äldre material med förhållandevis låg vatten- och organisk halt. Norrman och Königsson (1972) anger beteckningen "glaciofluvial suspended sediments (varved clay)" om sedimenttypen. Varvigheten kan vara mer eller mindre uttalad. Sedimenttypen förekommer i ytan i två områden. I djuppartierna öster om Visingsö, där den postglaciala depositionen är obefintlig (nolltillväxt), på grund av det låga materialtillskottet och den energirika vattenmiljön, och i transportbottenområdena, som flankerar djuppartiet i mellersta Vättern utanför Motalabukten.

Dessa äldre finsediment är förhållandevis konsoliderade, vattenhalten är i genomsnitt 52.8 % och dess innehåll av föroreningar är ringa. Typen är mycket lätt att särskilja från andra lösare och mörkare sediment i ytläge.

Sedimenttypen är påfallande lik den typ som betecknats bruna striade finsediment. Dessa förekommer dock ej i ytläge. De två typerna kan endast särskiljas genom förekomsten respektive avsaknaden av striae.

Sedimenten kan uppträda med varvighet varvid ljusare lager omväxlar med mörkare mera leriga lager.

#### 5) Svarta finsedimenten.

De svarta finsedimenten förekommer endast sporadiskt i Vättern och aldrig som ytsediment. De tycks framför allt finnas i ett område i östra södra Vättern (stationerna 25, 34 och 44) samt i centrala mellersta Vättern. Av lagerföljden att döma är de inte avsatta synkront. Även det ojämna tungmetallinnehållet indikerar att de inte hänger ihop tidsmässigt. I vissa fall, där sedimenten förekommer förhållandevis ytligt och sydligt, är t ex Hg-halten relativt hög, t ex 195 ng/gts vid station 25. I andra lägen är Hg-halten mycket låg, t ex 12 ng/gts vid station 126 eller 0 vid station 44.

Sedimenten kan vara av lokal sapropeltyp men den svarta färgen kan också förklaras av andra orsaker. Typen

behöver undersökas ytterligare för att säkra slutsatser beträffande bl a genesen skall kunna dragas.

6) Grå striade finsedimenten.

Denna sedimenttyp förekommer i mellersta och norra Vätterns djuppartier. Den avviker från de homogena grå till mörkgrå finsedimenten i södra Vättern framför allt genom förekomsten av små mörkare järn- och manganrika striae. Järnhalten förefaller vara av samma storleksordning i de båda sedimenttyperna medan manganhalten tycks vara betydligt högre i den striade typen (600-4 000  $\mu\text{g Mn/gts}$  mot ca 20 000  $\mu\text{g Mn/gts}$ ). Dessa värden emanerar från T Hasselrot (opublicerat material).

I övrigt har de båda sedimenttyperna mycket gemensamt. Vattenhalten är ca 70-80 % och organiska halten ca 8-10 % i båda sedimenten.

De mörka banden är sannolikt framför allt en följd av FeS-utfällning och således en form av sapropelbildning. Mörkfärgningen kan eventuellt accentueras av  $\text{MnO}_2$ , som enligt Mackereth (1966) kan ge sedimenten en svart nyans.

De grå striade finsedimenten tycks inte förekomma som ytsediment. I alla prover har de överlagrats av ett tunt lager av de bruna till mörkbruna ytsedimenten.

I två fall (142 och 164) fanns dessutom ett tunt lager av de röda konsoliderade finsedimenten mellan ytsedimenten och de grå striade finsedimenten. Sedi- menttypen är dock sannolikt postglacial. I flera fall ligger den direkt ovanpå den ljusgrå leran.

Ett antal zinkanalyser (från Hasselrot, opublicerat material) indikerar lågt Zn-innehåll, varför det finns anledning att anta, att sedimenttypen är preindustriell.

#### 7) Bruna striade finsedimenten.

Som redan nämnts påminner denna sedimenttyp, utom vad gäller den markanta bandningen, om de äldre ljusbruna lersedimenten.

Denna sedimenttyp förekommer tillsammans med den ljusbruna typen och sannolikt föreligger en kontinuerlig övergång mellan typerna. De förekommer inte som yt- sediment och lagerföljden är komplicerad (appendix 1). Eventuellt förefinns likheten med den gyttjebandade leran i Östersjön (Jerbo, 1965 eller Ignatius et al. 1968).

Endast två Hg-analyser har gjorts på sedimenten och dessa analyser gav låga halter, ca 10 ng/gts.

Vattenhalten är låg, 57.7 % i genomsnitt, liksom organiska halten, 4.4 % i medeltal.



8) Svarta fibersedimenten.

Dessa sediment har endast påträffats i viken innanför Dimestorps fyr. Sedimenten domineras helt av utsläppen från Olshammars bruk. De är kraftigt förorenade och uppvisar gasutveckling,  $H_2S$ -odör och förhöjt tungmetallinnehåll.

Vattenhalten är omkring 90 % och organiska halten är mer än dubbelt så hög som Vätterns ytsediment för övrigt. Värdena ligger över 30 %. Kvicksilverhalten är i storleksordningen 500-700 ng/gts. På grund av sedimentens höga vatten- och organiska halt motsvarar detta dock inte mer än 31-40 ngHg/cm<sup>3</sup> vs. Jämfört med andra liknande fiberrika sediment är inte dessa värden anmärkningsvärt höga (Axelsson och Håkansson, 1973 och Håkansson och Uhrberg, 1973).

Sedimentens spridningsområde är också mycket begränsat, några km utanför primärrecipienten (=viken) är bottenarna till synes helt opåverkade av utsläppen från Olshammars bruk.

På grund av primärrecipientens skyddade läge kommer utsläppen att bli kvar så länge som vikens kapacitet av sedimentfälla är intakt.

- 9) Röda-bruna-svarta relativt konsoliderade finsedimenten.

Lundqvist (1938, 1942a) har relativt utförligt behandlat förutsättningarna för utbildandet av en sedimenttyp som uppvisar stora likheter med dessa sediment. Enligt Lundqvist bildas dessa sediment genom att framför allt järnoxidhydrat utfälls i syrerik miljö (limonitutfällning). Förutsättningarna inbegriper således järnrikt basmaterial och syrerik miljö. Båda dessa krav uppfylles i Vättern, där limonitutfällning också tycks vara mycket vanlig. Den förekommer över hela sjön och på alla vattendjup. Oftast överlagras den direkt av de recenta finsedimenten, men den förekommer även i mer komplexa lagerföljder. Denna undersökning synes därför inte bekräfta Lundqvists (1942a) teori "I vilket fall som helst indicerar limonit i ett sediment, att det bildas relativt nära land, på ett icke alltför stort djup och i ett relativt upprört vatten".

Det är emellertid möjligt att Lundqvist med limonit-sediment framför allt avsåg större och mer sammanhängande lager, som speciellt förekommer i mindre sjöar, och att förekomsten av de relativt konsoliderade finsedimenten i Vättern inte motsäger Lundqvists teori. Sedimenttypen i Vättern har därför inte kallats för limonit-sediment.

Problemet med limonitutfällning och mineralrika konkretioner har för övrigt uppmärksamats mycket i marin miljö. Men även i de stora amerikanska sjöarna har sedimenttypen identifierats (Cronan and Thomas, 1970).

Vattenhalten är i genomsnitt 67.1 % och organiska halten ca 7.0 %.

Sedimenttypen förekommer inte som ytsediment och dess innehåll av föroreningar är lågt.

#### 10) Grovsedimenten (mo-sand)

Enligt Atterbergs välkända indelning av minerogent material efter storleken i olika korngrupper gäller:

Korngrupper	Storlek (mm)
Block	> 200
Sten	200-20
Grus	20-2
grovgrus	20-6
fingrus	6-2
Sand	2-0.2
grovsand	2-0.6
mellansand	0.6-0.2

Korngrupper	Storlek	
Mo (=finsand)	0.2-0.02	
grovmo		0.2-0.06
finmo		0.06-0.02
Mjåla	0.02-0.002	
Ler	< 0.002	

Den aktuella typen av grovsediment (mo-sand) representerar således material av storleken 0.02-2 mm.

Sedimenttypen dominerar i strandnära partier, i Motalabukten och i området norr om Visingsö. Materialet kan ha olika ursprung. Det är dels, enligt Norrman och Königsson (1972) "glaciofluvialt icemargin deposits", dels "postglacial to recent subaquatic-slope deposits".

Materialet är karakteristiskt för bottnar där erosions- och transportprocesserna dominerar. Det innehåller mycket litet finmaterial, organiskt material och föroreningar.

Vattenhalten är i genomsnitt 27.7 % och organiska halten 1.8 %.

Dessa grovsedimentbottnar är typiska som lekomyråden för ådelfisk, vilket bör medföra, att de inte bör utnyttjas för sandtåkt.

## 11) Grovsedimenten (sand-grus-sten)

Denna bottentyp återfinnes, liksom den föregående, i strandpartier. Speciellt frekvent förekommer dessa grövre grovsediment i Motalaviken, kring Fjuk och Sandön.

Vattenhalten är något lägre än för den föregående typen, 20.8 % mot 27.7 %.

Likaså är organiska halten lägre, endast 0.5 % i genomsnitt. Föroreningsinnehållet är naturligtvis också mycket lågt.

## 12) Bruna till mörkbruna grövre finsedimenten.

Dessa sediment representerar en typisk blandform mellan de bruna till mörkbruna finsedimenten och grovsedimenten. Norrman och Königsson (1972) visar också mycket vackra bimodala kornstorleksfördelningar för dessa sediment.

Typen är karakteristisk för Vätterns energirika miljö och den täcker hela 28 % av botten och framför allt områdena, där transportprocesserna dominerar.

Vattenhalten är i medeltal 46.9 %, men variationerna är av naturliga skäl mycket stora. Standardavvikelsen är hela 13.0 %. Organiska halten är 3.7 % i genomsnitt

och spridningen är även för denna parameter stor ( $s = 3.1$ ). Sedimenten innehåller förhållandevis låga halter tungmetaller och närsalter.

Variationerna är dock stora mellan olika delar av sjön.

Sedimenttypen förekommer huvudsakligen som ytsediment med en mäktighet av 1-5 cm.

13) Ljusbruna grövre finsediment.

Denna sedimenttyp är en blandning av antingen de äldre ljusbruna finsedimenten eller de bruna striade finsedimenten och grovsediment. Sedimenttypen förekommer såväl som ytsediment, kring Visingsö, och som djupsediment.

Vattenhalten och organiska halten är låg, i genomsnitt 40 % respektive 3.5 %. Variationerna är dock, liksom för den föregående blandsedimenttypen, betydande.

Sedimenttypen är karakteristisk för transportbottenförhållandena och den härbärgerar inga betydande mängder föroreningar.

14) Beteckningen avser provtagningsstationer, där inget prov erhöles.

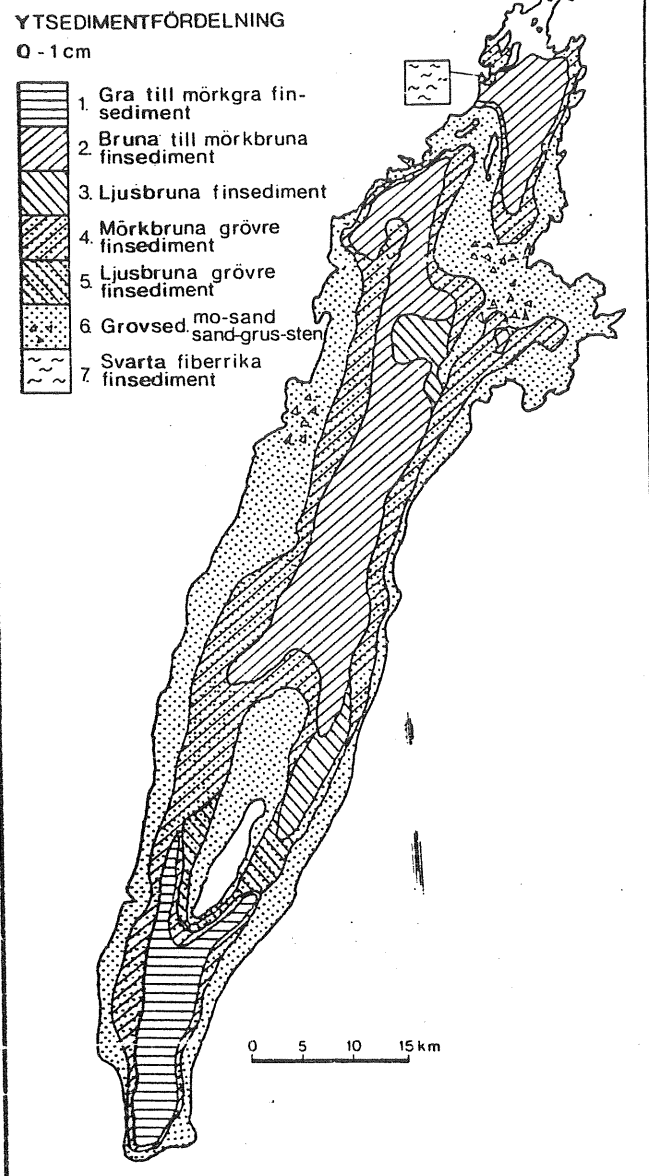


Fig.5 Ytsedimentfördelning (0-1 cm) i Vättern.  
Distribution of surficial sediments (0-1 cm) in Lake Vättern.

Tabell 4 . Ytsediment (0-1 cm) i Vättern.

	Finsediment (fine)	Blandade sediment (mixed)	Grovsediment (coarse)
= Recenta finsediment Recent fine sediments	W = 79.9 R = 63.1-88.9 S = 6.4 n = 49	48.1 31.3-67.2 12.3 19	24.8 13.3-37.2 5.8 17
= Grövre finsediment, blandade (recenta) Coarser fine sediments, (recent mixed)	IG = 11.1 R = 4.6-33.0 S = 4.4	3.8 1.2-10.8 3.1	1.6 0.2-6.6 1.8
= Grövre finsediment, blandade (recenta) (äldre) Coarser fine sediments, (recent mixed) (older)	W = 51.0 R = 46.7-55.1 n = 4	43.2 33.3-53.9 3	
= Grovsediment Coarse sediments	IG = 3.0 R = 1.3-6.3	9.3 8.7-10.4	

W = medelvattenhalten (mean water content)  
R = variationsbredden (range)  
S = standardavvikelsen (standard deviation)  
n = antalet analyser (number of analyses)  
IG = medelorganiska halten (mean organic content)

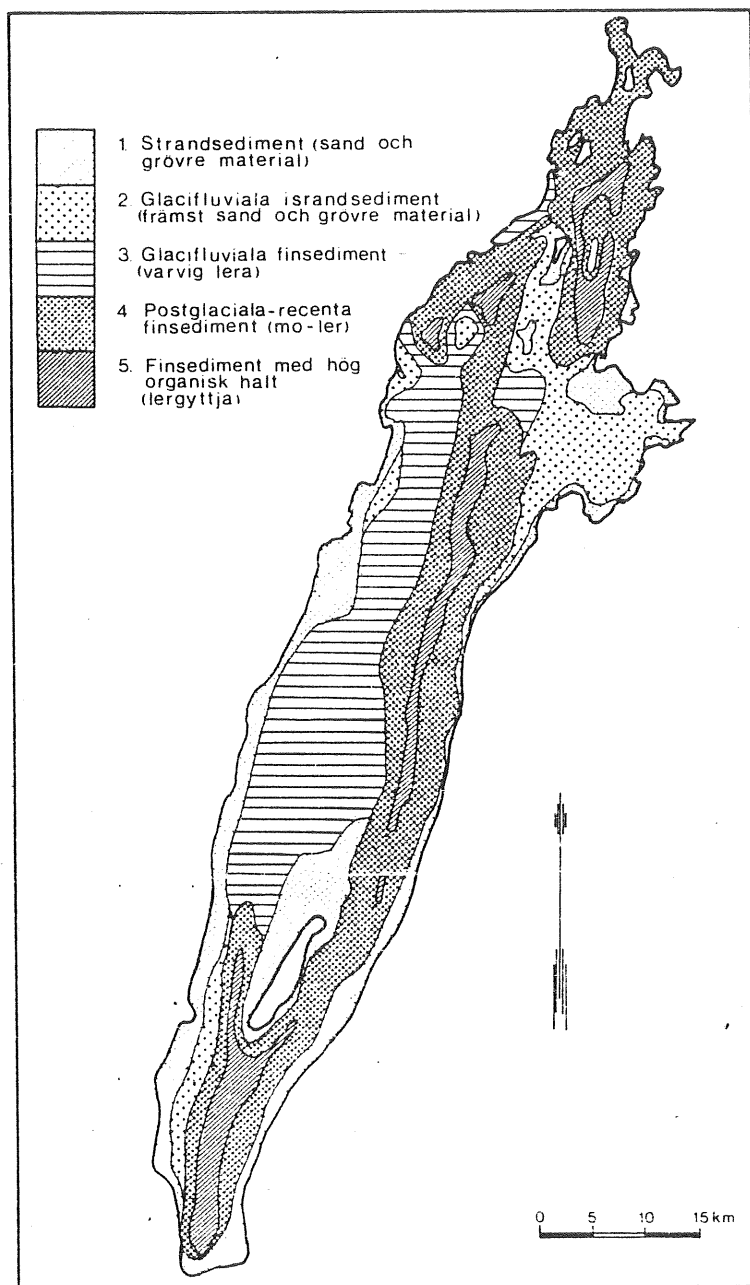


Fig. 6 Sedimentfördelning i Vättern enligt Norrman och Königsson (1972).

The sediment distribution in Lake Vättern according to Norrman and Königsson (1972).

- 1) Shore sediments (>0.2 mm).
- 2) Glaciofluvial ice-margin deposits (>0.2 mm).
- 3) Glaciofluvial suspended sediments (varved clay).
- 4) Postglacial to recent subaquatic slope deposits (sand to clay).
- 5) Silty sediments with a significant organic content (silty mud-gyttja).



Lundqvist (1924) använde sig av ett sedimentklassificerings-system, som är uppbyggt enligt:

- |   |                                 |
|---|---------------------------------|
| A. Makroskopiskt iakttagbar lersubstans   | leryttja (av olika typer)       |
| B. Makroskopiskt iakttagbar kalk  |                                 |
| 1. Övervägande - nästan enbart kalkslam   | bleke, övergår i följande       |
| 2. Riklig organisk (gyttje-)substans  | kalkgyttja, övergår i D 2 b.    |
| C. Makroskopiskt iakttagbart järn   | diatoméockra (och sjömalm)      |
| D. Makroskopiskt ej karakteriserad av ler, kalk eller järn.   |                                 |
| I. Grundmassan både i fuktigt och torrt tillstånd mörk, ofta grov, blandad med bruna humusutflockningar | sjödy (av olika typer)          |
| II. Grundmassa ljusare, i torrt tillstånd vit-grå   |                                 |
| 1. Grundmassan under mikroskopet fin, gulaktig och i regel obestämbar                                   | findetritusgyttja               |
| 2. Grundmassa under mikroskopet till stor del bestämbar.  |                                 |
| a. Strukturen grov, karakteriserad av vävnadsfragment av högre växter eller grova alger                 | grovdetritusgyttja              |
| b. Grundmassan utgöres till stor del av väl bevarade alger, ofta myxofycéen, detritus hyalin            | algyttja<br>övergår ofta i B 2. |

Gyttjelera avsätts i grunda bäcken och vikar som det yngsta ledet av postglaciala leror. Gyttjelera innehåller 2-6 vikts-% organiskt material, främst gyttjesubstans. Vid torkning spricker gyttjelera sönder i små korn och kallas ofta grynlara.

På grund av ursprunglig hög halt av järnsulfider har ytliga delar av gyttjeleran ofta en stark sur reaktion.

Lergyttja innehåller 6-30 vikts-% organiskt material.  
(ISGU Beskrivning till jordartskarta allmän del)

Bleke och kalkgyttja övergår utan gräns i varandra men i mera utpräglade fall är skillnaden stor. Bleket består av övervägande kalciumkarbonat med en relativt obetydlig del organiskt material: grov eller vanligen fin detritus. Bleket är vanligen ganska homogent men kan ibland innehålla lager av kalkinkrusterade Charastammar. Detta tyckes särskilt vara fallet, då lagerföljden tillväxt hastigare, varför det ser ut, som om Chara-skikten representerar kraftigare sedimentationsförhållanden.

Kalkgyttjorna är uppbyggda av kalciumkarbonat och gyttjesubstans i ytterst tät och fin växellagring eller blandning. Ibland kan dessa gyttjeskikt alltid av alggyttjetyp svälla ut och bli ett par cm mäktiga.

Diatoméockra är en vanligen starkt järnockrehaltig diatoméjord, som övergår åt ena hållet i ren diatoméjord och åt andra i ren järnockra. Gyttjesubstansen är alltså ganska underordnad eller i varje fall helt förjárnad. Den förekommer i elitoralen och övre profundalen ut till 4 m djup (Lundqvist 1924).

Kiselgur - Diatoméockra - Järnockra

Si                      15-40 % Fe                      Fe

Dy Man skiljer på grovdy och findy.

Den förra utgöres av vävnadsfragment o dyl med utfällda humusämnen.

I det följande avses findyn och hithörande sediment av sjödy och sjörik findetritusgyttja.

I sin mera utpräglade form är dy bundet till mindre sjöar och vissa mossgölar. Deras bildning förutsätter en stark tillförsel av humusämnen till sjön. Detta sker genom humusförande vattendrag, alltså bäckar etc som kommer från områden med kärr eller mossar. Man tycker, att om torvmarkerna når fram till sjön, borde utfällningen bli så mycket starkare, men så är icke alltid fallet. Detta beror på vattnets obetydliga rörelse i torvmassan (Lundqvist, 1942).

Findetritusgyttja består övervägande av strukturlös,

ljus gulaktig detritus.

Dessutom till-

kommer i mycket underordnad grad som sådan bestämbar detritus av fanerogamer och kärlekryptogamer. Färgen är i naturtillstånd grågrön eller brungrön vid närvaro av dyssubstans. Bestämbara mikrofossil är huvudsakligen diatomaceer, enstaka grönalger och caldocer-rester.

Findetritusgyttjan avsättes under lugnare förhållanden, alltså antingen på djupet eller

på skyddade ställen.

Grovdetritusgyttja karakteriseras av grov fanerogam och kärllkryptogamdetritus eller i vissa fall av mycket grov algdetritus (Cladophora etc). Bland igenkännbara rester spelar nymphaeace-delar en framträdande roll.

Färgen är i naturligt tillstånd mörkt grön med starkt bruna nyanser. Grov detritusgyttja avsätter sig dels under lugna förhållanden, dels i upprört vatten inom exponerade sjödelar, i vilket sistnämnda fall den kan vara rätt starkt sandförande. Djupet är sålunda starkt växlande, och det ställer sig ofta mycket svårt att av enstaka prov bedöma, om sedimentet är av litoral eller profundal typ.

Grovdetritusgyttjan kan i fall av extrem grovlek närma sig litoral\_dy (stranddy) och svämtorv. Dessa jordarter bildas vanligen på grunt vatten (ca 1 m) och i skyddat läge, men därjämte kan de inom samma bäcken avsättas på djupare vatten i exponerat läge (5-10 m).

Alggyttja. Grundmassan är algrester av olika slag. Mellansubstansen är grov eller fin, ljus till hyalin detritus.

Alggyttjornas färg är grön-rödbrun eller blodröd.

Mineralkorn är sällsynta, vilket förklaras av alggyttjans uppkomstsätt.

Den fordrar näringsrikt, helst något kalkhaltigt, alltså humusfattigt, klart vatten. Vanligen bildas den därför i sjöar, omgivna med stora, täta vassar, vilka hindrar uttransport av mineralslam och humus. Den torde knappast bildas på större djup än 2-3 m, vanligen mindre. I varje fall anträffas den aldrig vid mera exponerade stränder. Av ovan antydda anledningar förekommer den oftast i det naturliga slutstadiet i en kalksjös utveckling. Alggyttjorna representerar i viss mån ett gränsfall av de förut behandlade högkalkiga sedimenten, men i färdigbildat skick för de sällan makroskopiskt synlig kalk. Att märka är dock, att alggyttjorna kan anläggas som rena kalksediment. I sådana fall är det okonsoliderade ytgyttjelagret bildat av grova chironomidrör inkrusterade med kalk. Inkrustationen, som endast förekommer i det ytligaste lagret, är så pass starkt, att sjöns hela ytgyttjelager är överdraget med en sammanhängande kalkskorpa. Huruvida detta förhållande är periodiskt eller ej, är ej helt klart, men troligen saknas det under vintern. Kalkskorpan skyddar emellertid ytgyttjan i nivå med de undre delarna av chironomidrören för lufttillträde (Lundqvist 1924).

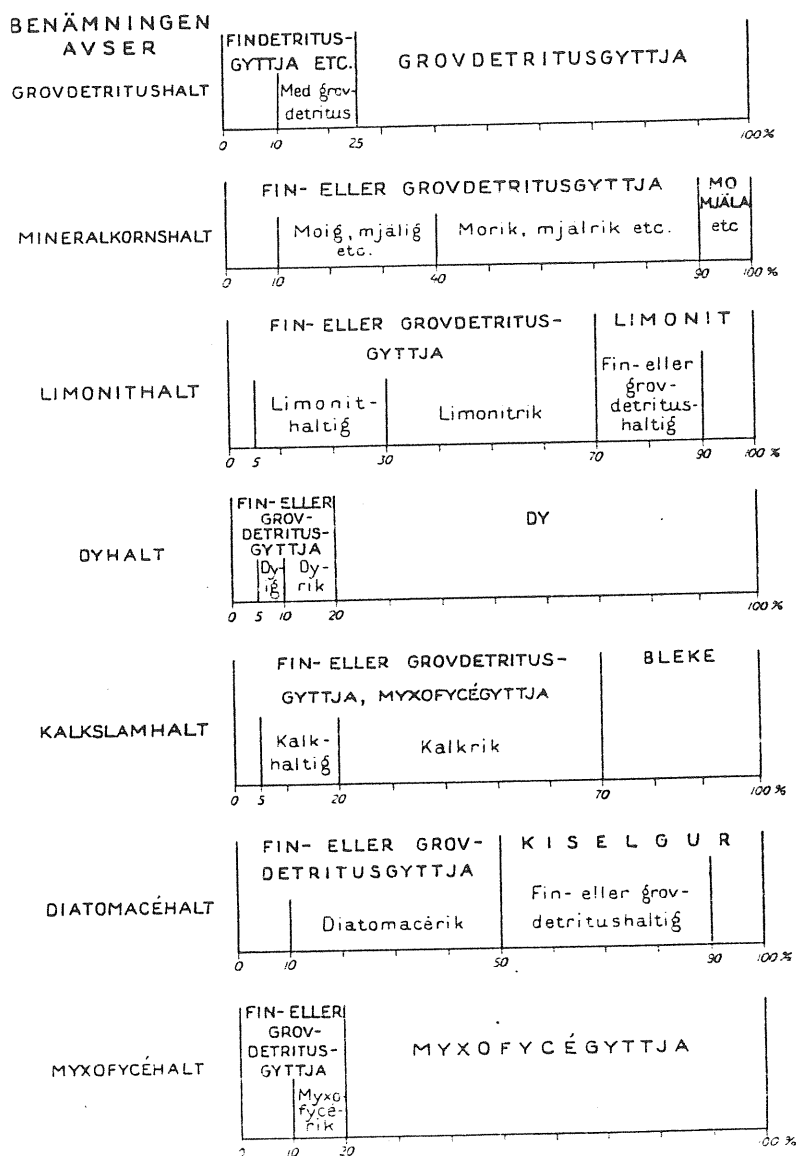


Fig.7 Klassificering av organiska sediment enligt Lundqvist (1940)

Termerna gyttja och dy har länge varit föremål för diskussion. Sjösediment består i princip av tre beståndsdelar:

- 1) organiskt material
- 2) minerogent material
- 3) av oorganisk biogen beståndsdel mest bestående av diatomeskal och biogent utfälld kalciumkarbonat.

Hansen (1959) menar, att gyttja är en blandning av rester från alla döda organismer i en sjö, kemiskt utlöst material och minerogent material. Dy består ej enbart av bruna sura humuskolloider, utan är en gyttja blandad med dopplerit.

Gränsen mellan gyttja och dy definieras av  $C/N = 10$  (kol, kväve). Ju högre tal desto dyigare sediment. Termen dygyttja har dock ingen reell betydelse.

Hansen anser sålunda, att en riktig beskrivning av termerna gyttja och dy görs av Hampus v. Post:

Gyttja är en koprogen bildning bestående av en blandning av växtrester, diatoméskal, kvarts och glimmerkorn, kisel nålar från spongier och skal från insekter och skaldjur som lever i sjön tillsammans med pollen och sporer från kryptogamer. Färgen är grå till rödgrå.

Dy är brun eller svartbrun och består av samma beståndsdelar som gyttja men också med bruna humuspartiklar.

Den deponeras i sjöar med brunt vatten. Dy är en gyttja blandad med bruna, sura humuskolloider (Dopplerit).

## 6.2 Utfällningar

- 1) järnoxidhydrat (järn eller limonit)
- 2) kalciumcarbonat (kalk)

Järnsedimenten är vanligtvis limonitrik findetritusgyttja, limonit eller sjömalm.

Deras djupläge inom sjön växlar med sjötypen på så sätt, att i en sjö med mörkare vatten ligger de grundare. Närmast stranden är järnutfällningen obetydlig. På ca 1 m ökar den och når vanligtvis max på 2-4 m djup, för att där utanför hastigt avta. Ca 2-4 m är den egentliga sjömalmzonen. Hur den är fördelad i en vanlig smålandssjö framgår av kartan över Vidöstern (fig 8 ).

På kartan har ej tagits hänsyn till lägre sjömalms-halt än  $8 \text{ kg/m}^2$ . Sjömalmsområdena på Vidösterns botten har därför en något större utbredning än kartan visar. Av denna framgår, att sjömalmen vanligtvis saknas närmast land, och den når sällan större djup än 6 m. Vidare kan tilläggas, att sjömalmen endast sällan finns på lös botten. Orsaken kan vara den, att järnutfällningen upphör, om sediment, alltså gyttja, pålagras de utfällda kropparna.

Förutsättningen för järnutfällningen är nämligen rik syretillförsel, och detta sker lättare i rörligt vatten. Just denna vattnets rörlighet hindrar sedimentavsättning.



Järnutfällning sker inte endast på hård botten, även om den når sin största omfattning där. På lös botten blir effekten helt annorlunda. Det är denna företeelse som tar sig uttryck i sedimentens limonit-halt. Limonit förekommer på lös botten som små korn som infiltration i gyttjesubstansen eller som utfällning på exkrementklumparna. Järnutfällning är bunden till sjöarnas grundare delar. Detta gäller mörka vatten. I ljusa ligger järn-zonen djupare (ca 10-20 m mot ca 5 m). Limonit i ett sediment indicerar att det bildats relativt nära land på ett icke alltför stort djup och i ett relativt upprört vatten.

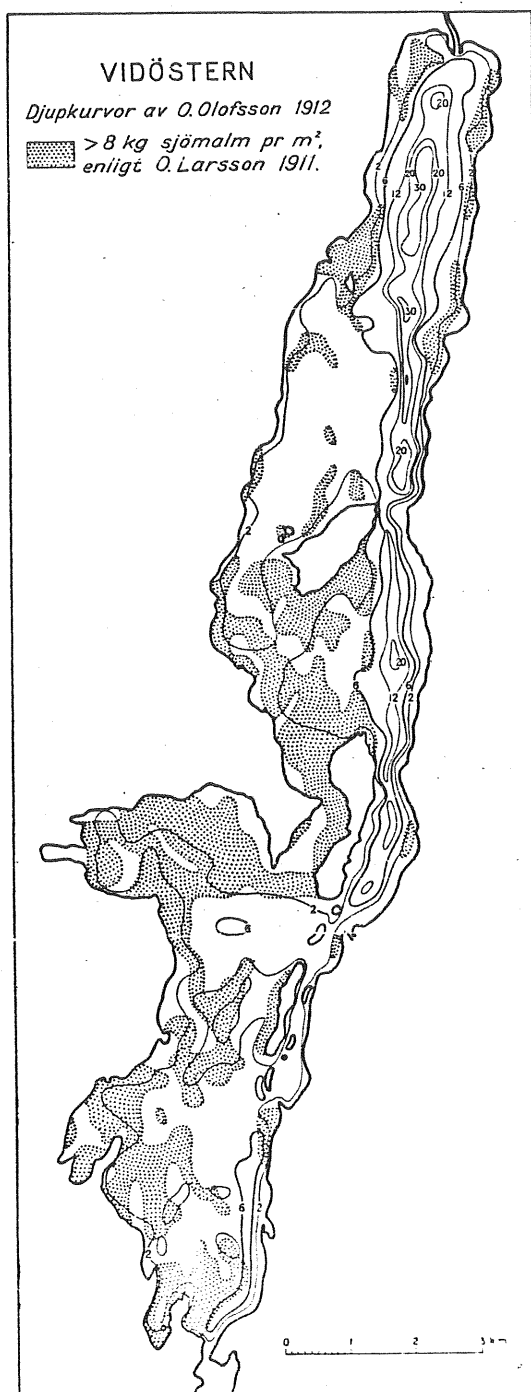


Fig.8 Sjömalmen tillhör sjöns grundare områden. Vidöstern har gulbrunt vatten och transparensen 2.3 m. (Thurmark 1937); i en sjö med ljusare vatten ligger järnet djupare. Efter Nauman 1922.

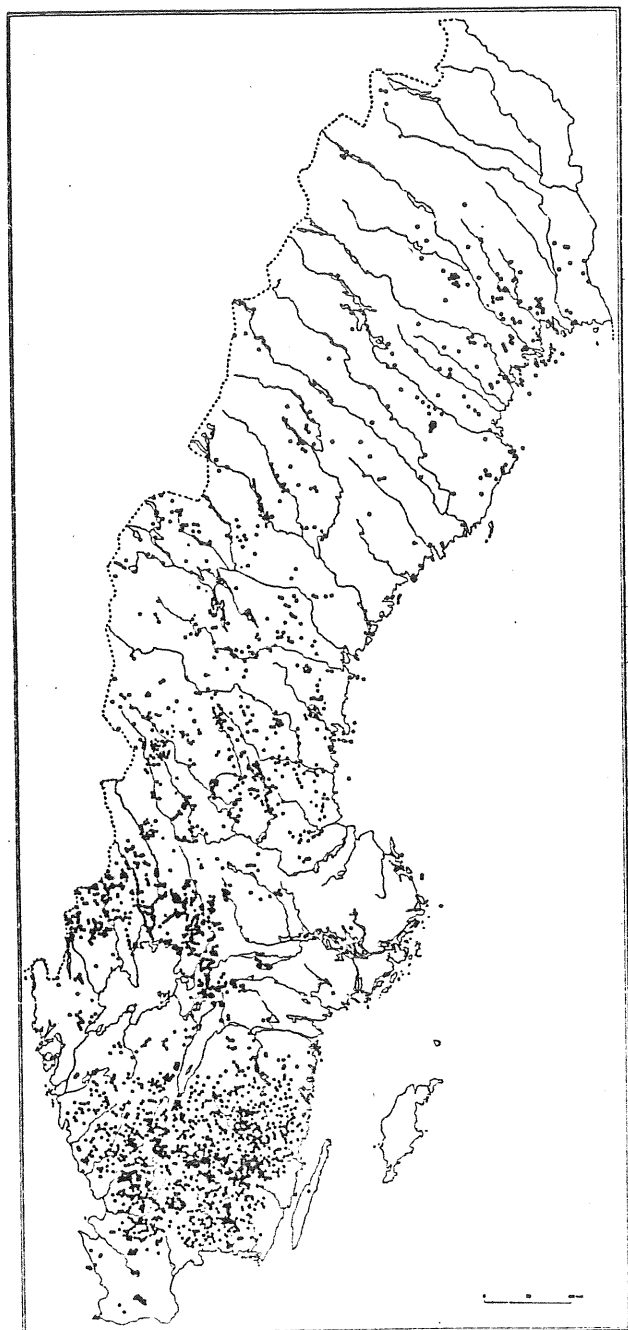


Fig.9 Järnutfällningar (sjö- och myrmalm och ockror). Dessutom ha förekomster av slagg från primitiv järnhantering (x) medtagits. I övre Norrland tillkommer ett antal lokaler; de ändra dock inte spridningsbilden. Efter Lundqvist 1939

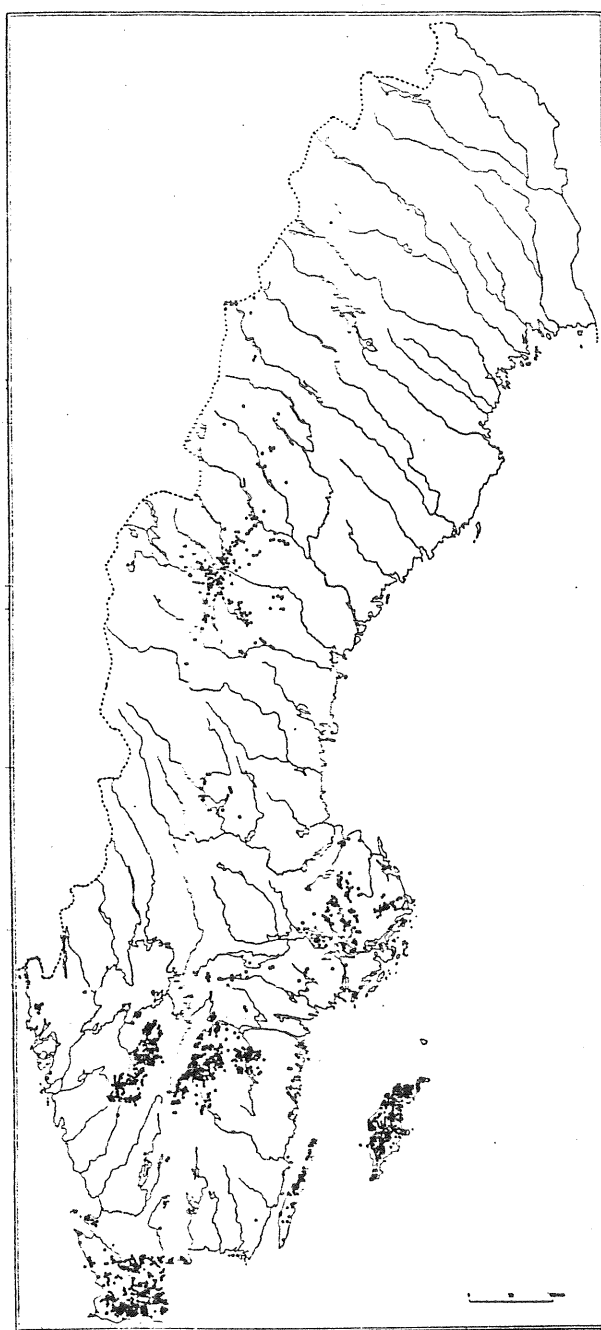


Fig.10 Recenta och fossila kalkutfällningar. I Abiskotrakten och i Jämtland tillkommer några lokaler, vilka dock ej ändra spridningsbilden. Efter Lundqvist 1939

Kalk förekommer som slam, finkorniga aggregat eller flagor avlossnande från växter på vilka det utfällts eller är ännu kvarsittande.

Till sjöarnas kalksediment hör bleke och kalkgyttja, vilket sistnämnda är ett allmännare kollektivbegrepp för kalkhaltig och kalkrik findetritusgyttja och deras varianter.

Kalksedimenten anträffas vanligtvis i grunda mindre sjöar, tex på Öland, Gotland, i Uppland, Abiskotrakten. De synes vara jämnt fördelade över sjön.

Både kalk och järn tillhör sjöarnas grundare delar. Båda avtar mot djupet.

Kalken tillhör sjöarnas äldsta lager, medan järnet tillhör de yngsta.

Kalksediment slutade bildas t ex i södra Östergötland och norra Småland för 8-9 000 år sedan, medan järnsediment funnits endast under de 2 000 sista åren. Detta förhållande sammanhänger antagligen med omgivningarnas beskaffenhet. Genom inverkan av väder och vind, främst av nederbörden, undergår jordarterna urlakning på så sätt, att de lösligare ämnena löses ut hastigare än de andra. De förs sedan med avrinningen ut i sjöarna och utfälls där. Järnsediment är utbredda över större delen av vårt land. De saknas dock i kalksedimentområden samt i områden med lerslätter.

### 6.3 Sedimentens regionala fördelning

Ur sedimentsynpunkt kan man indela landet i flera olika områden.

1) Områden med mineralkornsrika sediment.

De är av två typer, nämligen ett med grövre, moiga och ett med finare, mjäliga-leriga typer. De förra tillhör fjällen och de stora älvarnas stråk, de senare lerslätter och liknande trakter.

2) Områden med findetritusgyttjor. Av dessa finns underområden med järnsediment, dysediment och slemalgsediment.

3) Områden med kalksediment (Lundqvist 1949)

Man kan också dela in sjöarna med avseende på sedimenttyp.

Sjöar i passpunktområden: Små, klart grönt. Sedimenten rika på fossil, särskilt myxofycéer. Uppblåsningssytan liten - mineralkornshalten låg.

Skogssjöar: brunt vatten, sediment med utfällningar av limonit, findy. Mineralkornshalten har stigit något.

Sedimentområden: Sjöarna inom mjälslätterna. Stränderna relativt lätteroderade, vilket medför mineralkornsrika sediment (grovmjåla vanligtvis). Utfällningar sällsynta.

Samlingsbäcken: stora sjöar med stor uppblåsningsyta -  
mineralkornen större. Utfällningar mest limonit, spar-  
samma men dock rikligare än tidigare.

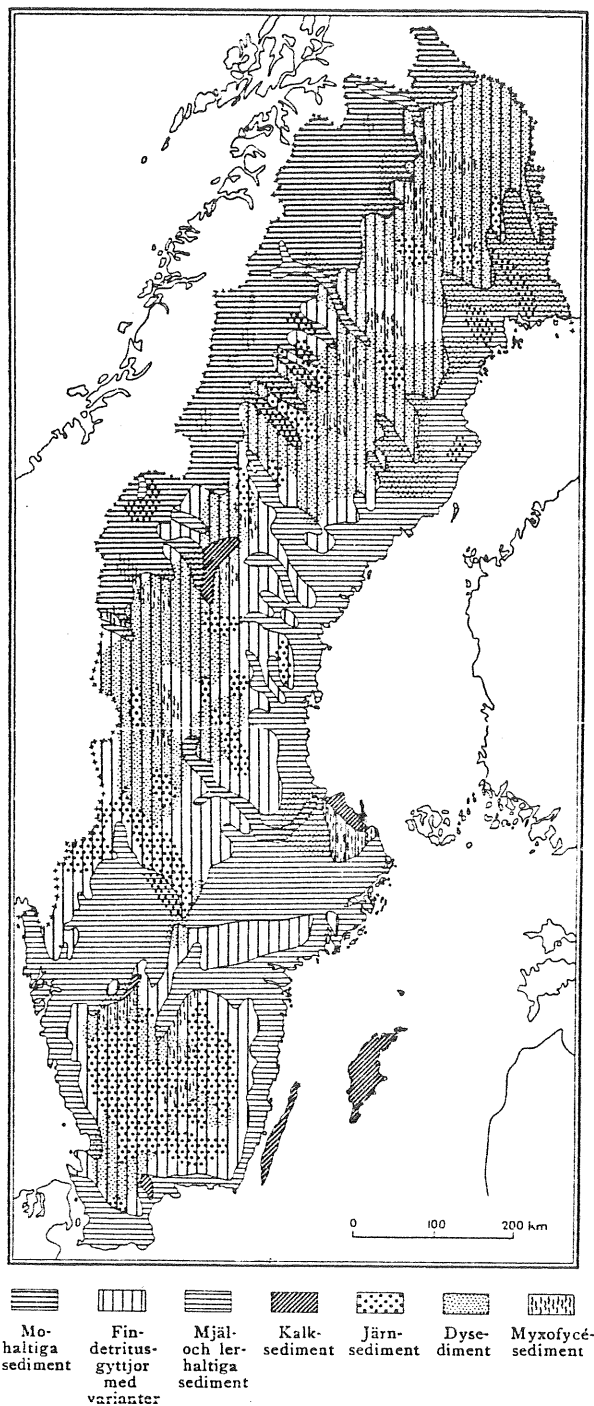


Fig.11 Utbredning av sedimenttyperna karakteriserade av materialets art. Beteckningen för t.ex. dysedi-  
ment anger endast, att inom dessa områden finnas  
sådana sediment mer än inom andra. Kartan visar  
bl.a. att skogsområdena rymmer de flesta varian-  
terna, sedimentområdena däremot är mycket mono-  
tona. (Lundqvist 1942)

Sedimentslätterna har ett mycket kraftigt inflytande på sedimenttypen. Det är särskilt detritustypen, som påverkas, i det att vi här erhåller lergyttjedetritus. Det behövs endast relativt små sedimentområden i sjöns närhet, för att dessas effekt skall bli påtaglig. Samtidigt kan man även säga, att sedimentslätternas inflytande minskar i samma mån som kornstorleken hos deras jordarter ökar. (Lundqvist 1939).

#### 7. SEDIMENTATIONSPRINCIPER

Sedimentationen sker alltid upp till sedimentationsgränsen utom i de fall, då de detritusproducerande organismerna av en eller annan anledning lever under denna nivå. I klara sjöar ligger zonerna djupare (ljuset tränger ned) och att sedimentationsgränsen ej nås av denna anledning. Tillväxten genom planktogent material sker regelbundet över hela sedimentationsområdet på så sätt att på de djupaste partierna avlagras mest. Profundalsedimenten kan ibland nå över det som anses vara sedimentationsgränsen (Lundqvist 1924).

I djupare sjöar sker den starkare sedimentationen i skyddat läge och sedimentationsgränsen är övervägande beroende av mekaniska förhållanden. Om sjön är klar eller ej är likgiltigt.

Sedimentets struktur (t ex grov- eller findetritus) beror till stor del på samma orsak. Sålunda kan ett

grovt sediment i exponerat läge bildas på betydligt större djup än ett finare i skyddat läge.

I grundare sjöar med stark bottenproduktion sker den starkaste sedimentationen till skillnad från föregående typ i exponerat läge.

Extrema fall har iakttagits, då åtminstone en del av gyttjans definitiva sedimentationsområde ligger mellan hög-och lågvattenslinjerna.

Sannolikt svarar i varje fall mot kombinationen biologi-mekanik (strömningsförhållanden, vattendjup, etc) en viss övre sedimentationsnivå. Sedan sedimentationen fortgått upp till denna nivå ligger sedimentytan så gott som död, dvs tillväxten är praktiskt taget avstannad. I de fall då de mekaniska förhållandena tillåter sedimentation upp till  $< 1/2$  m under lågvattenlinjen, kan igenväxning ske men ej under andra förhållanden. De ovan funna sedimentationsprinciperna torde sannolikt vara att tillämpa invid sedimentationsgränsen även ute på större djup och gäller i tillämpliga delar även minerogena sediment. (Lundqvist 1924b)

Principen för den sedimentationstyp som karakteriseras av bankning (se fig 12 ) är följande:

Av någon anledning, sannolikt åtminstone delvis förorsakad genom lokalt kraftigare vegetation, bildas en liten uppbuktning på sedimentytan, och denna lilla

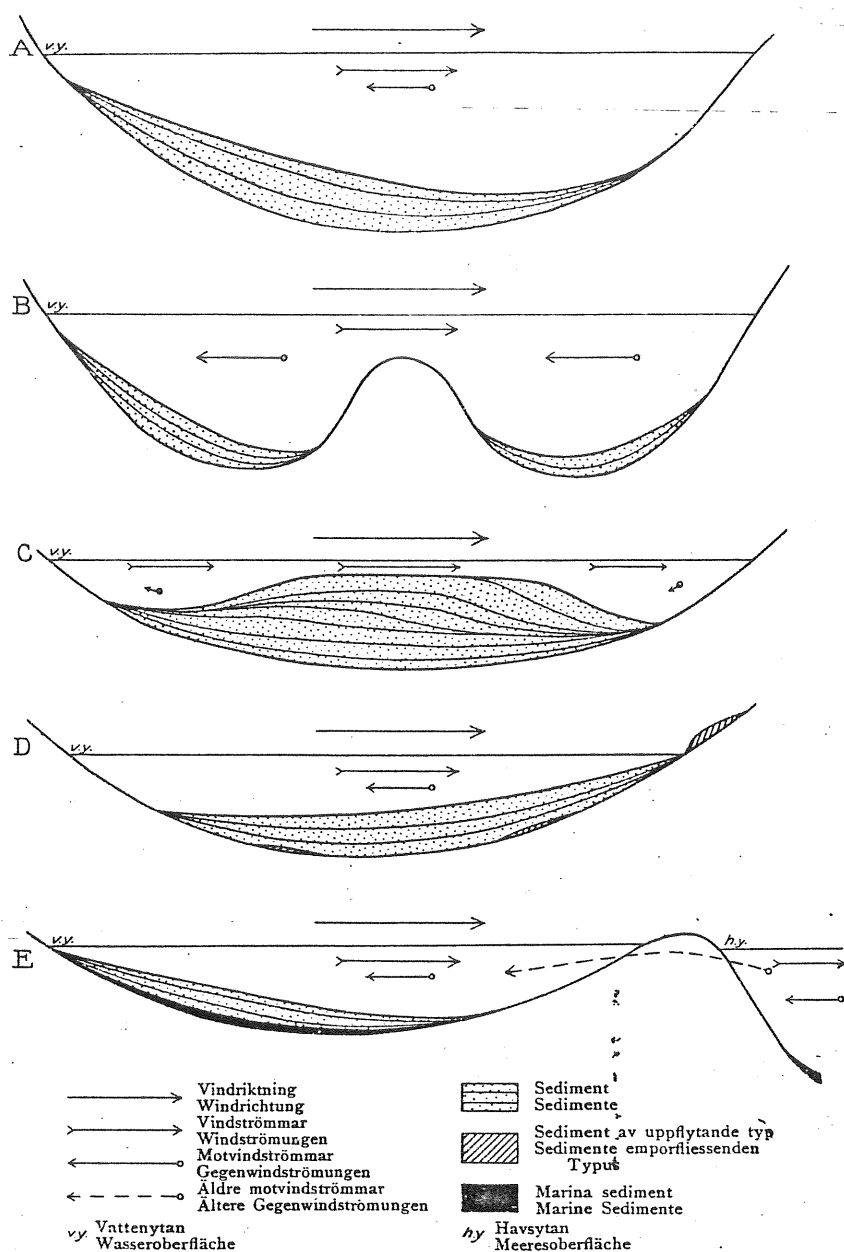


Fig.12 Exempel på sedimentationstyper. Normal sedimentation: A i enhetliga bäcken, B i bäcken med grundpartier. - C. Utveckling av sedimentationsbankar. - D. Sedimentation i bäcken med viss högproduktiv bottenalgflora av grov struktur (uppflytning och partiell destruktion). - E. Sedimentation i en lagun efter isoleringen. (Lundqvist 1924)



kupol är initialen till banken.

Det osedimenterade materialet föres sedan av strömmarna till större delen i lä om kupolen, medan vegetationen dels skyddar för erosion, dels bidrar till vertikaltillväxten. Banken kommer alltså att tillväxa huvudsakligen i strömriktningen men påbyggs på samma gång uppåt mot vattenytan. Samtidigt med tillväxten sker även en tillskärpning av formen på så sätt att lovartsidan blir långsamt lutande och läsidan brantare.

Sänkorna i denna sjö representerar gamla sedimentationsytor. För att sedimentbankning skall kunna komma till stånd, erfordras rätt stora öppna vattenytor, vilka möjliggör uppkomsten av kraftigare vindströmmar (Lundqvist 1924).

#### 7.1 Sedimenttypernas förhållande till omgivningarnas geologiska beskaffenhet

Beskaffenheten av omgivningarnas geologiska avlagringar i såväl mekaniskt som kemiskt hänseende utövar det största inflytandet på sedimenttyperna. Deras struktur är bestämmande för den omfattning, tillförseln av material i fast form till sjön erhåller (t ex ler, slam och sand). Deras kemiska karaktär bestämmer ämnestillförseln i löst form (t ex kalk, järn).

Av största betydelse för sedimentbildningen är till vilken grad urlakningen av omgivande fastmarker skett och sker. Urlakningen av densamma är nämligen av utslagsgivande betydelse för alla sediment utom de rent mekaniska lersedimenten. Bortses från lersedimenten domineras stratigrafien kemiskt av järn och kalksediment enligt utvecklingsföljden:

stark kalk → svag kalk → tämligen neutralt →  
svagt järn → starkt järn.

En fullständig lagerföljd återspeglar en gradvis skeende övergång från kalksediment (kalkgyttja och bleke) till järnsediment (ockrehaltiga jordarter och sjömalm).

Det blir alltså bestämmande för sedimentbildningen inom en viss trakt, huruvida den är uppbyggd av:

- 1) lera och moränlera
- 2) kalkmorän (och kalkberg)
- 3) urbergsmorän (och urberg)
- 4) om torvmarker når fram till sjön

Av denna markbildare har de tre första regional betydelse, medan torvmarkerna endast har lokalt inflytande.

1) Lerornas och moränlerornas utbredning bestämmer till mycket stor del utbredningen av en av syd- och mellansveriges, geologiskt sett viktigaste sjötyper, lerslättssjöarna, vilkas sediment utgöres av lergyttjor. Det behövs endast, att i sjöns omgivningar leran eller moränleran går i dagen inom ett mycket begränsat område, för att lagerföljden skall ha influerats därav. Leran inverkar t o m så starkt på sedimentationen, att den dominerar över kalken inom kalkområdena, t ex Tåkern.

Utmärkande för lerslättssjöarnas sediment är, att de vanligen i sin översta del är starkt svavel-järn- och pyritförande, vilket antyder att de genomgått reduktionsprocesser, ofta förorsakade genom eutrofering till följd av odlingen. Dessa reduktionsprocesser möjliggöres genom stark bottenutfällning av avdöende plankton, alltså rik ävjebildning.

2) Kalkhaltig morän (och kalkberg) förorsakar åtminstone litoralt bildning av kalksediment, som utan gräns övergår i snäckgyttjor och alggyttjor. Dessa måste alltså vara utmärkande för områden med svagare kalkhalt.

Då kalkhalten i jordarterna etc är beroende på isens materialtransport från siluområdena, bör denna kalkhalt avta i riktning från siluområdena. Av det sagda framgår, att man kan vänta sig starkare kalkhaltiga

sediment (bleke och kalkgyttja) närmare silurområdena och svagare kalkhaltiga alggyttjor längre därifrån. Det vill säga, att alggyttjorna utgör de limniska kalksedimentens regionala gränsfacies, men att de alltjämt utmärker slutstadiet i en sjös kalkepok.

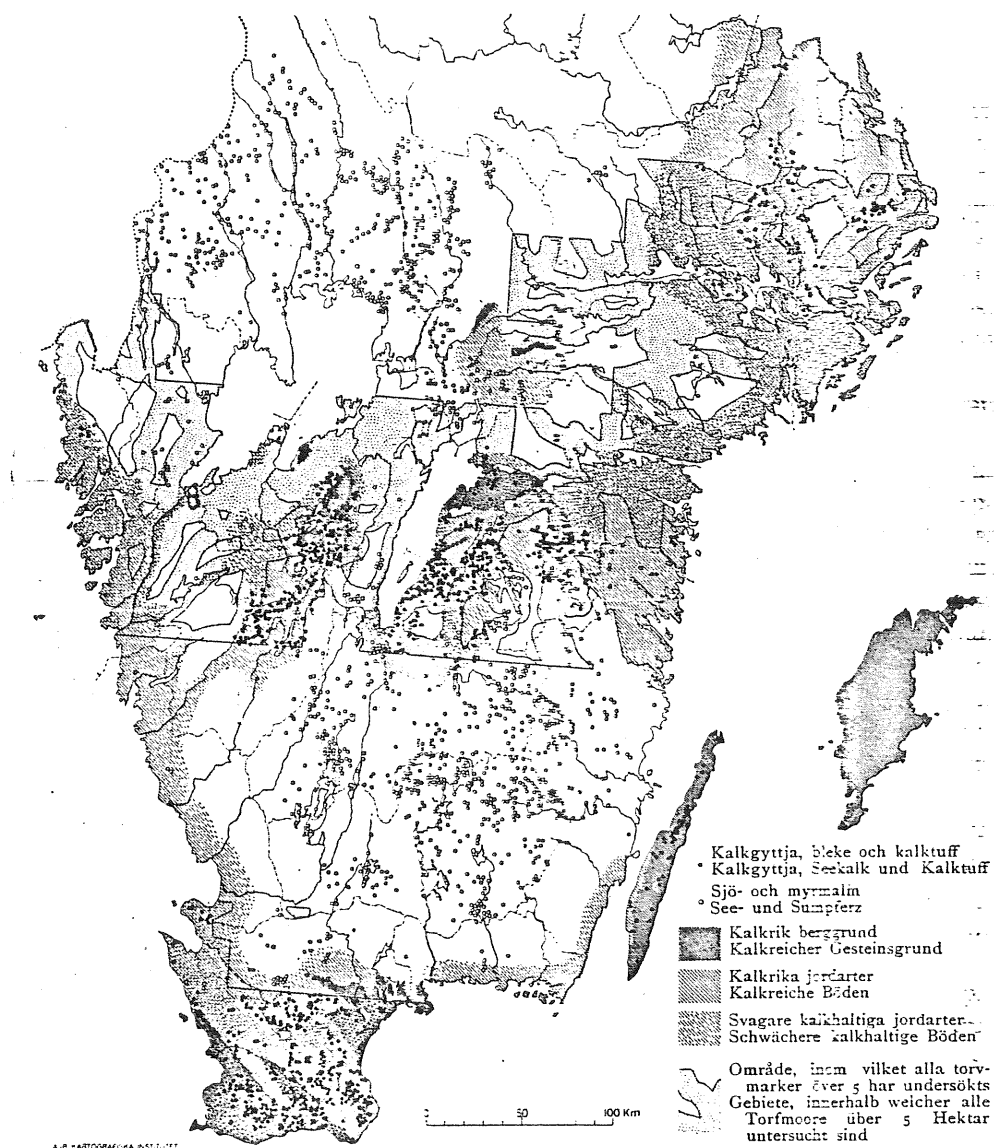


Fig.13 Kalk- och järnutfällningar i södra Sverige. Kalk- och järnsediment utesluta i stort sett varandra: inom kalksedimentens område, "kalkområdet", saknas sjömalmer nästan helt, järnutfällningarna är där myrmalmer och okonsoliderade ockror, lagerföljderna av t.ex. Uddebosjöns, Sommens och Sjögarpssjöns typer. I det egentliga "järnområdet" är sjömalmer vanliga och lagerföljderna av Rasjöns, Stråkens och Fiolens typer. Inom övergångsområdena mellan de båda nämnda områdena, "alggyttjesjöarnas zon", är lagerföljderna av Axamosjöns och Skärsjöns typer. (Lundqvist 1924)

3) Urbergsterrängens sjöar producerar gyttjor och dygyttjor samt sjömalm. Till detta område är även diatoméockrorna begränsade. Gyttjorna är vanligen dyhaltiga utom i de äldsta lagren, där de är sandiga eller leriga. De äldsta huvudsakligen de gammalpostarktiska gyttjelagren inom urbergsterrängens sjöar närmar sig alggyttjorna. Dessa är ofta pyritförande, vilket antyder gynnsamma näringsförhållanden.

4) En faktor av stor lokal betydelse för sedimentet är närvaron av torvbildning invid sjön. Inom urbergsområden med föga kalkhaltig eller kalkfri morän, blir sedimenten i detta fall starkt dyhaltiga och övergår i extrema fall i sjödy.

I en lerslättsjö däremot har humusämnena tydligen mycket svårt för att inverka på sedimentbildningen. Annorlunda är däremot förhållandet inom kalkområdena, där humusämnena är av mycket stor betydelse för sjöns biologiska förhållanden. I de extrema kalksjöarna är produktionen i flera avseenden ganska låg. Då humusämnen är närvarande, dvs då någon myr stöter intill eller avrinner till sjön, märks en avsevärd produktionsstegring (Lundqvist 1942).

## 7.2 Inverkan av sjöns vegetation

Vegetationen har ur flera synpunkter en mycket stor betydelse för sedimentens utformning.

I första hand är detta såsom leverentör av det organiska materialet, alltså den organiska detritusen, vilket utgör huvudparten i våra insjösediment.

Grovdetritus = celler eller vävfragment

Findetritus = strukturlös flockig massa, delvis är den bildad genom stark destruktion av den förra, delvis är den planktogen.

Grovdetritus är rikligare i anslutning till den högre vegetationen, medan findetritus hör hemma under de öppna vattnen. (Lundqvist 1942).

Grovdetritus utgör sällan någon större del av sedimentet. Även om flytbladsväxternas zon är grovdetritushalten över 10 %. Vegetationen hindrar mineralkorn-tillförseln ut i sjön. I de fall, då vegetationen förekommer runt sjön är mineralkornhalten alltid minimal

## 7.3 Kulturmarkernas inverkan

En speciell bottentyp utmärkes av att lagerföljdens

översta del är gråblå, blåsvart eller svart och är rik på FeS. Det är vad man sammanfattar under benämningen sapropel. Mäktigheten av detta lager beror av hur lång tid de sapropelbildande jäsningprocesserna ägt rum samt av deras intensitet. Egentligen är det icke ett lager utan en serie mörka och ljusa skikt. Ett av vardera sorten utgör tillsammans ett årsskikt.

Utan en minutiös granskning, ter sig emellertid hela sedimentet alldeles svart, ytterst finkornigt, strukturlöst och vällingartat. Knappast annat än diatoméer, huvudsakligen planktonformer är igenkännliga. I sådana fall är bottenvattnet syrefritt och svavelväterikt och bottenvegetationen så gott som enbart svavelbakterier. Det är således i vårt land icke en naturprodukt utan beroende av kraftigt näringstillskott från omgivningarna. Viktigast i detta hänseende är kloakernas tillförsel, gödselvatten från ladugårdar, åkrar, etc. Ju mindre föroreningen är, desto djupare ligger den nivå, till vilken sapropelbildningen når upp.

Sapropelbildning kan emellertid ske, även om föroreningen genom artificiell påverkan icke är så stark. Detta inträffar, om sjöns ekologiska miljö befinnes i exakt sådant tillstånd som medför luxuriering av en viss växt. Då massor av denna bottenfälls, kommer ett täckande ytlager att bildas på botten, varigenom luftutbytet mellan det underliggande sedimentet och vattnet förhindras. Livliga jäsningprocesser, svavelbildning m m kommer igång och bottenprofilen får sin sapropeltyp (Lundqvist 1942).

## 8 SEDIMENTENS EGENSKAPER

Sedimentens egenskaper brukar karakteriseras av vattenhalt, organisk halt, kornstorleksfördelning samt pH. Dessa ändras lateralt och vertikalt.

I sedimentens ytskikt avtar i regel den organiska halten liksom vattenhalten mot djupet, medan tätheten ökar. På större djup är variationerna vanligen små.

8.1 Vattenhalt, densitet, halt av organiskt material

Vattenhaltens laterala och vertikala variation exemplifieras av fig. 14 och 15.

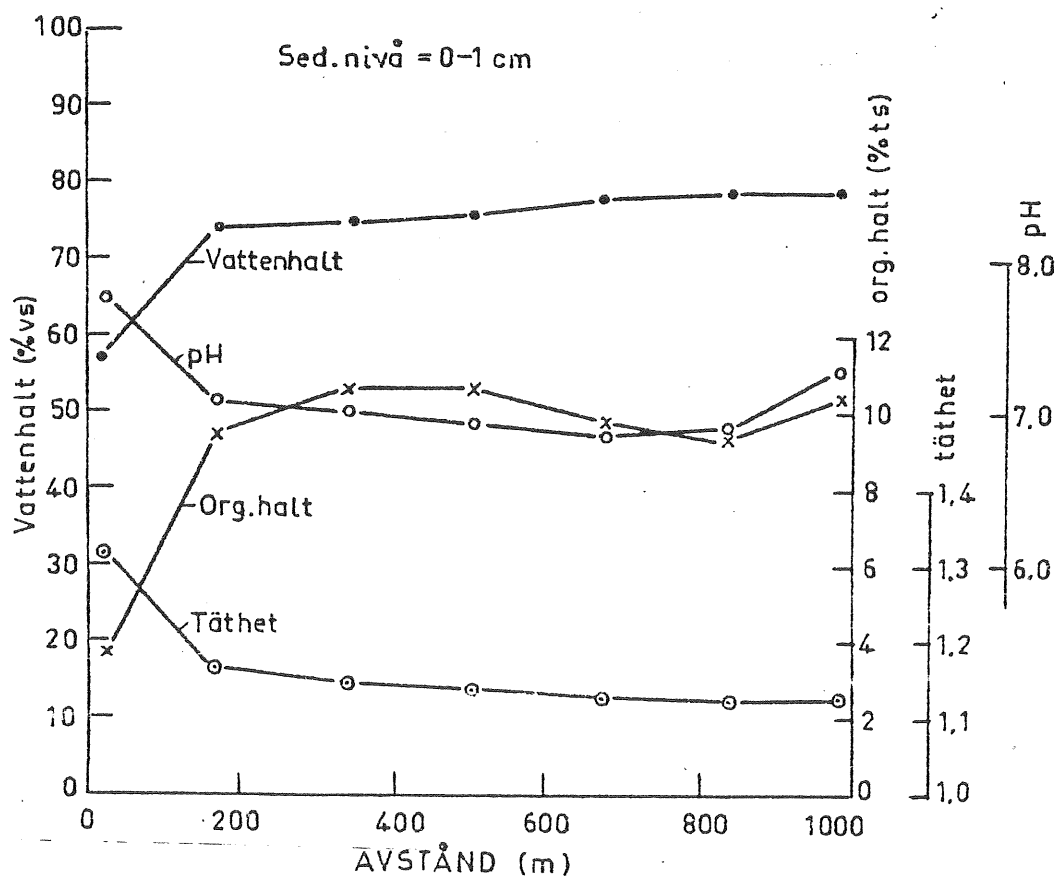


Fig 14 Lateral variation av vattenhalt, organisk halt, täthet och pH i sektion 03.



Där sedimentens ytskikt utgöres av gyttjelera upp-  
går vattenhalten ofta till ca 80 %. Vanligen avtar  
vattenhalten till en början relativt snabbt med  
ökat sedimentdjup. Under 1 m sedimentdjup är vatten-  
halten ofta lägre än 60 %. Normalt är vattenhalten  
lägre i littorala än i profundala sediment. Låga  
vattenhalter kännetecknar framför allt de littorala  
sedimentpartier, som anknyter till Uppsala-åsen, vilket  
är fallet längs stora delar av Ekolns östra och södra  
stränder, se fig 15.

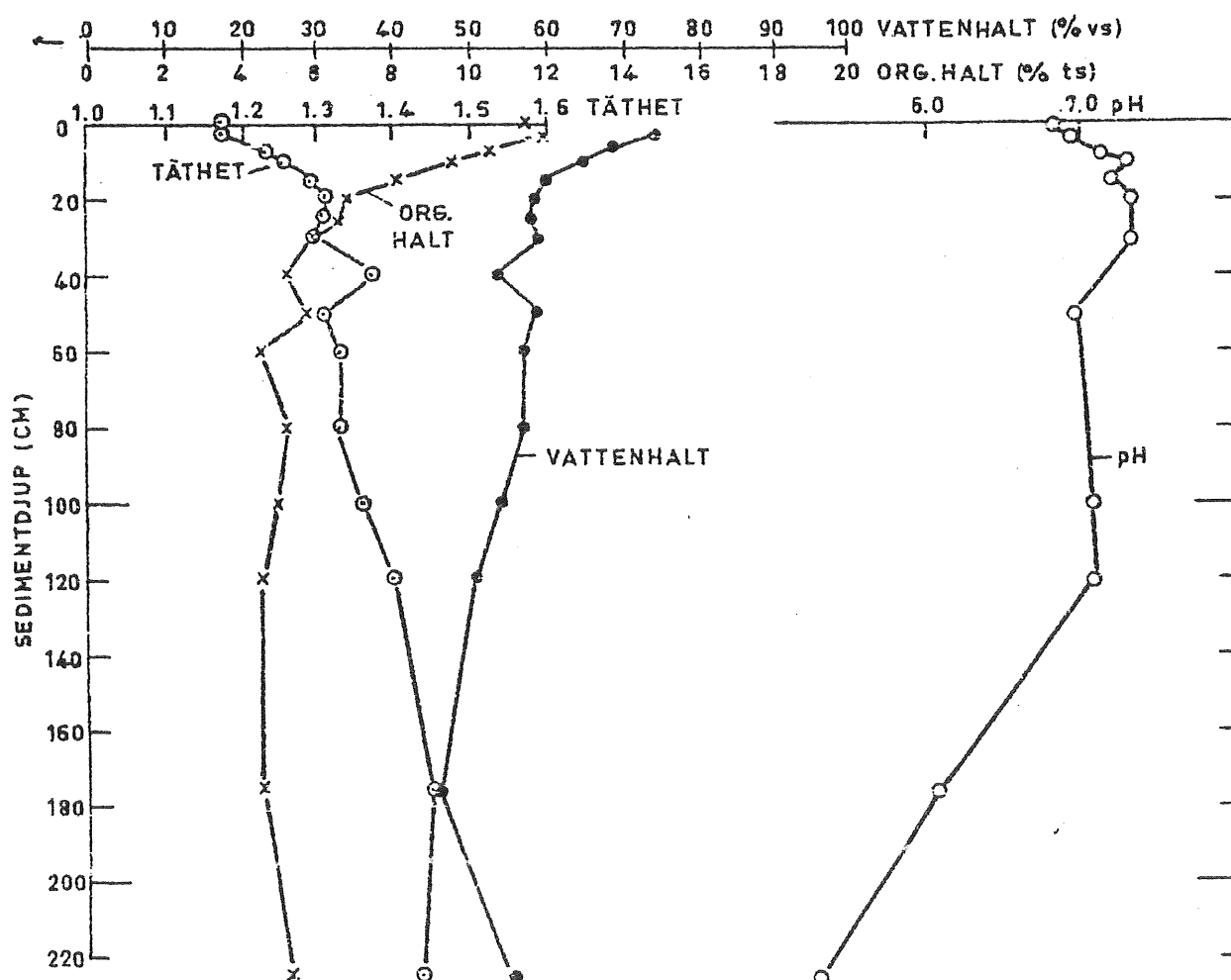










Fig 15 Vertikal variation av vattenhalt, organisk halt, täthet och pH  
i propp 100. Exempel från sjön Ekoln (Axelsson, Håkansson 1972)

Tätheten ökar också med ökad kornstorlek och minskad organisk halt och vattenhalt. Det biogena materialet består till större delen av små partiklar i suspension och sedimenterar med det finkorniga minerogena materialet. Biogent material sedimenterar med stor porositet och tillåter en större mängd vatten/volymsenhet att inneslutas i sedimentet än vad sediment med grövre kornstorlekar medger.

Tabell 5 . Vattenhalt (W), organisk halt (IG) och täthet ( $\rho$ ) i olika typer av ytsediment (0-1 cm). Då antalet prover som analyserats är mindre än 10 anges variationsbredden i stället för standardavvikelsen.

Water content (W), organic content (IG) and bulk density ( $\rho$ ) of different types of surficial sediments (0-1 cm). When the number of analyses is less than 10, the range is given instead of the standard deviation.

Sediment typ Sediment type	Antal prov Number of analyses	Medelvärden Mean values			Standardavvikelse Standard deviations		
		W	IG	$\rho$	W	IG	$\rho$
	16	78.4	13.8	1.15	3.6	1.2	0.03
	31	81.4	9.2	1.12	5.8	2.2	0.05
	4	51.0	3.0	1.61	46.7-55.1	1.3-6.3	1.38-1.80
	19	48.1	3.8	1.47	12.3	3.1	0.16
	3	43.2	9.4	1.50	33.3-53.9	8.7-10.4	1.37-1.71
	11	28.0	2.2	1.81	5.9	2.0	0.12
	6	20.5	0.5	1.98	13.3-25.9	0.2-1.0	1.84-2.15
	1	88.9	33.6	1.05	-	-	-

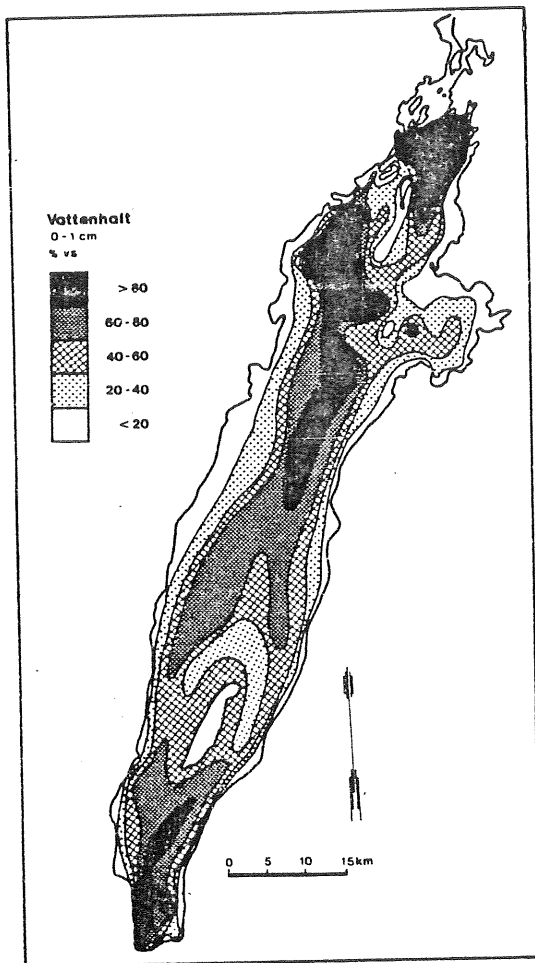


Fig.16. Vattenhaltens areella fördelning i Vätterns yt-sediment (0-1 cm).

The areal distribution of the water content of the surficial sediments (0-1 cm) in Lake Vättern.

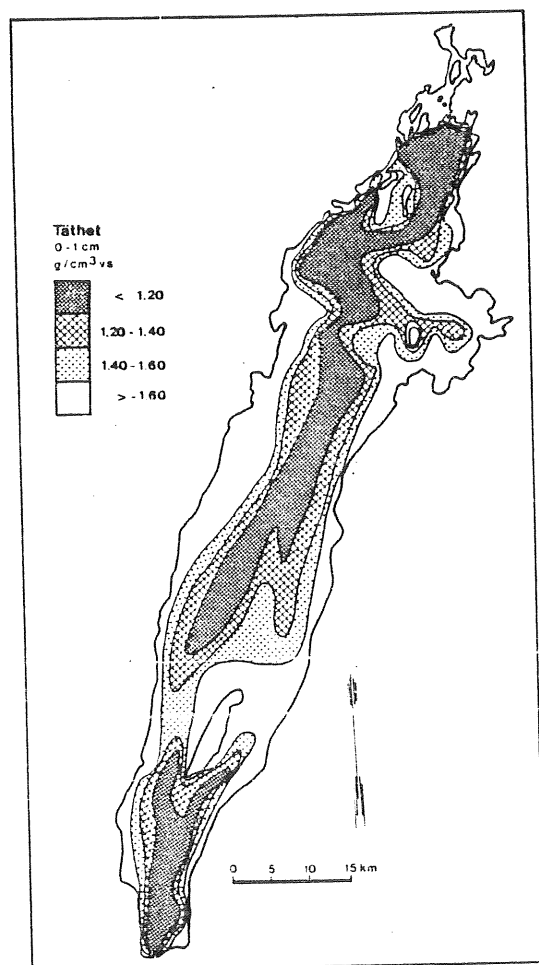


Fig.17 Täthetens areella fördelning i Vätterns yt-sediment (0-1 cm).

The areal distribution of the bulk density of the surficial sediments (0-1 cm) in Lake Vättern.

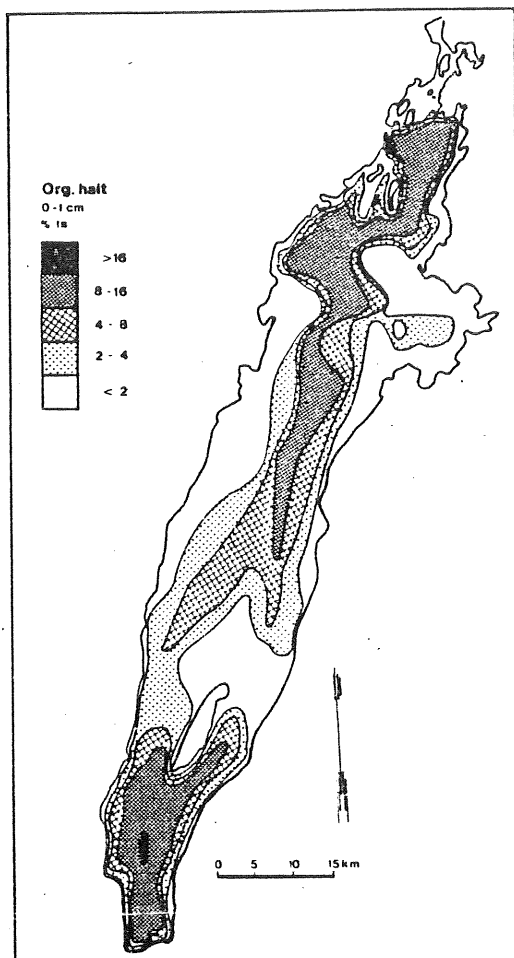


Fig.18. Organiska haltens (glödförlustens) areella fördelning i Vätterns yt-sediment (0-1 cm).

The areal distribution of the organic content (ignition loss) of the surficial sediments (0-1 cm) in Lake Vättern.

## 8.2 Termiska egenskaper

Litteratursökningen angående sjö- och havsediments kemiska egenskaper har givit begränsade resultat.

I samband med värme-flödesberäkningar i hav och sjöar har ett stort antal värmekonduktivitetmätningar utförts i sediment. Tyvärr har, i de studerade undersökningarna, sedimentens sammansättning ej beskrivits. Det är därför omotiverat, att i detta sammanhang redovisa dessa resultat. Ratcliffe, E.H. (1960) presenterar dock ett nomogram för havssediment (ej närmare beskrivna), där värmekonduktiviteten kan erhållas med kännedom om vattenhalt (med avseende på volym, våtvikt eller torrsvikt) och skrymdensitet, fig 19.

Johansen (1975) har utarbetat en metod för teoretisk beräkning av värmekonduktiviteten. Den är uppdelad i tre delar, varav den som avser helt vattenmättade jordarter är intressant i detta sammanhang. Värmekonduktiviteten kan beräknas med ett fel av  $\pm 10\%$  med kännedom om kvartsinnehåll och jordartens volymetriska sammansättning av vatten, is och jordpartiklar. (Modin 1979).

Johansens metod tar ej hänsyn till jordartens organiska halt, vilket gör den praktiskt taget oanvändbar för sjösediment. Möjlighet att i beräkningsmetoden även ta hänsyn till detta, ter sig dock ej omöjlig.

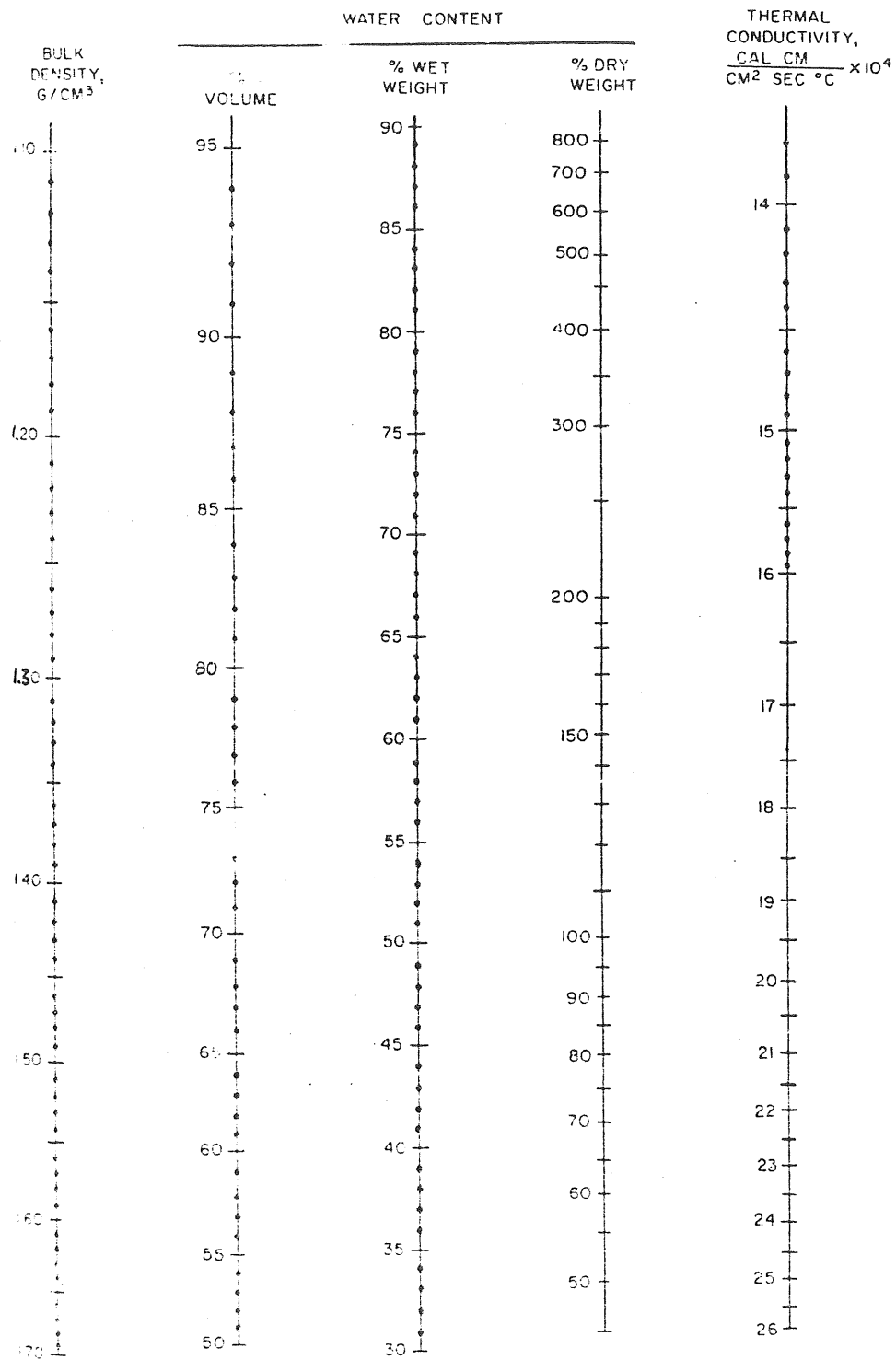


Fig.19 Havssediment. Diagram för bestämning av sedimentens värmeledningsförmåga vid 4<sup>o</sup> C och 1 atm. Efter Patcliffe (1960).

Carlsson, Stymne och Wettermark (1978) presenterar värden på värmeledningsförmåga och värmekapacitet (eg. värmekapacivitet) för några olika jordarter, tab. 6.

	Fukt- halt vol%	Värme- ledn.- förm. W/m, °C	Värme- kapa- citet MJ/m <sup>3</sup> , °C	Densitet kg/m <sup>3</sup>
Torv, förmultnad	46	0,3	2,1	370
Löst packad torr sand	-	0,2-0,3	1,3	1500
Natursingel, torr	-	0,3	1,2	1550
Sandig grus, torr	-	0,7	1,6	1800
Lera, styv	65	1,0	3,6	1640
Lera, lätt	60	1,2	3,5	1800
Packad sand och grus	15	1,7	2,8	2200
Morän, sandig eller lerig	27	2,3	2,7	2200
Hård sandsten	-	2,3	1,9	2300
Granit	-	2,6-3,5	2,1	2700

Tabell 6. Ungefärliga termiska egenskaper för några marktyper.

Saare, Wenner (1957) utförde med hjälp av en icke stationär värmesond bestämningar av värmeledningstal hos olika jordarter. Mätningarna utfördes dels på jordprover i laboratorium, dels på jordarter i naturlig lagring. Tyvärr anges inte, om jordarten vid högsta angivna vattenhalt är mättad eller ej. Värdena från denna undersökning är således ej direkt användbara i detta projekt.

Av undersökningen framgår dock, att utöver den torra volymvikten och vattenhalten, även lerhalten, glödförlusten, kalkhalten och humushalten har viss betydelse för jordarternas värmeledningsförmåga.

Vid nästan lika volymvikt och vattenhalt har jordarter med högre lerhalt ett lägre  $\lambda$ -värde. I jordarter med högre halt av brännbar organisk substans, vilken framgår av glödförlusten, erhålles lägre  $\lambda$ -värden. Kalkhaltiga jordarter visar ett högre  $\lambda$ -värde än jordarter utan eller med låg kalkhalt. Jordarter, som innehåller humus, har lägre  $\lambda$ -värden än humusfria jordarter.

### 8.3 Inverkan av frysning

#### **Temperaturens inverkan på jordarternas värmeledningsförmåga**

Värmeledningstalens beroende av temperaturen framträder påtagligast vid jordarternas övergång från icke fruset till fruset tillstånd. Några bestämmningar av värmeledningstal för naturligt lagrade jordarter i fruset och icke fruset tillstånd ha hittills inte publicerats. I fråga om temperaturens inverkan på värmeledningstalen refereras nedan resultat som Watzinger (1938) och Kersten (1949) kommit fram till genom försök med en apparatur som är beskriven . Försöken äro utförda med omrörda jordprover.

Vid temperaturer ovanför fryspunkten och upp till  $+20^{\circ}\text{C}$  stiger värmeledningsförmågan hos samtliga jordarter måttligt. Man brukar räkna med att värmeledningstalen vid temperaturen  $+20^{\circ}\text{C}$  i genomsnitt äro 4 % högre än värmeledningstalen vid en temperatur av  $+4,5^{\circ}\text{C}$ .

Vid högre temperaturer än  $+20^{\circ}\text{C}$  stiga värmeledningstalen kraftigt i jordarter där porerna delvis äro vattenfyllda. Denna stigning kan tillskrivas det förhållandet att större värmemängder transporteras genom porerna på grund av vattenångans diffusion



Värmeledningstalen vid 0° temperatur samt vid temperaturer omedelbart under och över fryspunkten visa säregna variationer vid olika vattenhalter.

Krischer (1941) antog att denna ändring av värmeledningstalen vid övergången till fruset tillstånd berodde på olikartad bildning av iskristallerna. Hos jordarter med mycket låga vattenhalter (lufttorra material) äro värmeledningstalen oförändrade vare sig jordarterna befinna sig i fruset eller icke fruset tillstånd. Vid lägre vattenhalter (6 % hos sandiga jordarter och 12 % hos finkorniga-leriga jordarter) äro värmeledningstalen 5—15 % lägre i frusen jord än i jordarter med samma vattenhalt men med en temperatur något över fryspunkten. Sannolikt beror denna minskning av värmeledningstalet på bildningen av icke sammanhängande iskristaller.

Vid högre vattenhalter än de sist angivna erhålles högre värmeledningstal hos jordarter i fruset tillstånd än hos samma jordarter i icke fruset tillstånd. Värmeledningstalens ökning följer i första hand den stigande vattenhalten. I vattenmättade och frusna jordarter är värmeledningstalet 20—40 % högre än i samma jordarter vid en temperatur något över fryspunkten.

Denna plötsliga ökning av värmeledningstalen vid övergången från icke fruset till fruset tillstånd beror här sannolikt på bildningen av sammanhängande iskristaller, som har ca tre gånger högre värmeledningstal än vatten ( $\lambda_{\text{vatten}} = 0,5$ ,  $\lambda_{\text{is}} = 1,5$ ).

Higashi (1953) redovisar försöksvärden erhållna genom laboratorieförsök med jordarter av vulkaniskt ursprung (vittrade tuffer och aska) i fruset och icke fruset tillstånd. Oavsett om de undersökta jordarterna ha väsentligt lägre värmeledningstal än de av Watzinger och Kersten undersökta, visa dessa samma karakteristiska ändringar vid övergången från icke fruset till fruset tillstånd. Higashi påvisar dessutom att en långsam frysning, som åstadkommer bildning av isskikt i den frusna jorden (tjällyftning) och resulterar i vattenhalter som överskrida mätningsgränsen, ger temperaturledningstal och värmeledningstal, som närma sig den rena isens.

I frusen jord med temperaturer från 0° till — 15°C äro värmeledningstalen i allmänhet oförändrade. Endast vid ett fåtal försök har man vid temperaturen — 15°C observerat en obetydlig minskning av värmeledningstalet, uppgående till någon %.

Saare, Wenner, (1957)

9. Sjöars hydrologi

Vatten har den unika egenskapen att det har densitetsmaximum vid  $+4^{\circ}\text{C}$ , dvs flera grader över fryspunkten. Detta har utomordentligt stor betydelse för omblandning, vattenutbyte och energi- (värme-)omsättningen i en sjö. En allmän beskrivning av hydrologiska förhållanden i sjöar ges i bilaga hämtad ur handboken Bygg.

Med tanke på värmeuttag vid eller i botten är vattnets temperatur samt strömmar nära botten av intresse, speciellt då under vinterperioden.

9.1 Vattenomsättning och isförhållanden

Strömmar och vattenomsättning under vintern, då isen hindrar vinden från att påverka sjön, är mycket litet känd. I sjöar av måttlig storlek och med ringa genomströmning kan vattenmassan stå i det närmaste stilla och vertikal värmetransport sker då bara genom molekyllär värmeledning, vilket är en mycket långsam process. Vissa mätningar tyder emellertid på att svängningar i istäcket kan ge upphov till relativt kraftiga strömmar även under den islagda tiden (Thandertz, personlig kommunikation).

Genomströmningen varierar kraftigt, i tiden såväl som mellan olika sjöar. Ett enkelt mått på genomströmningens betydelse för vattenutbytet ges av den nominella uppehållstiden,  $T_n$ .

$$T_n = V/\bar{Q} \quad (14)$$

där  $V$  är sjöns volym och  $\bar{Q}$  är medelavrinningen från sjön. För våra 20 största sjöar varierar  $T_n$  mellan 0,6 och 7,2 med undantag för Vättern som har en uppehållstid av 70 år (Falkenmark 1975). Generellt sett blir uppehållstiden kortare ju längre ned i ett avrinningsområde man kommer. Normalt sett har vattenföringen ett minimum under vintern och därmed lägre vattenutbyte. De flesta svenska vattendrag är emellertid reglerade för vattenkraftproduktion i syfte att höja vintervattenföringen.

I närheten av vattendragens in- och utflöden finns zoner med kraftigare strömmar och en turbulent blandning sker här mellan vattnet i sjön resp. ån eller älven. Denna ökade aktivitet avspeglar sig i bottenmaterialalets sammansättning och vattenhalt. Temperaturen, och därigenom densiteten, hos det tillrinnande vattnet kan skilja sig från sjöns genom att uppvärmning och avkylning sker snabbare i ett grunt och väl omblandat vattendrag än i den djupare och mera värmetröga sjön. Om vattendragets vatten är tyngre kommer det att rinna som en tung bottenström, varvid omblandning och värmetransport nära botten blir effektiv. Detta fall torde vara förhärskande under avkylningen på hösten. Om däremot lättare vatten tillförs sjön kommer detta att breda ut sig i ett skikt vid ytan och inte påverka botten annat än i en blandningszon nära utloppet. Under vintern då tillrinnande vatten håller nära  $\pm 0^{\circ}\text{C}$  kan man anta att detta är det vanliga förhållandet.

Fig. 26 visar några typiska strömsituationer och deras betydelse för alstring av turbulens (omblandning) i sjöar.

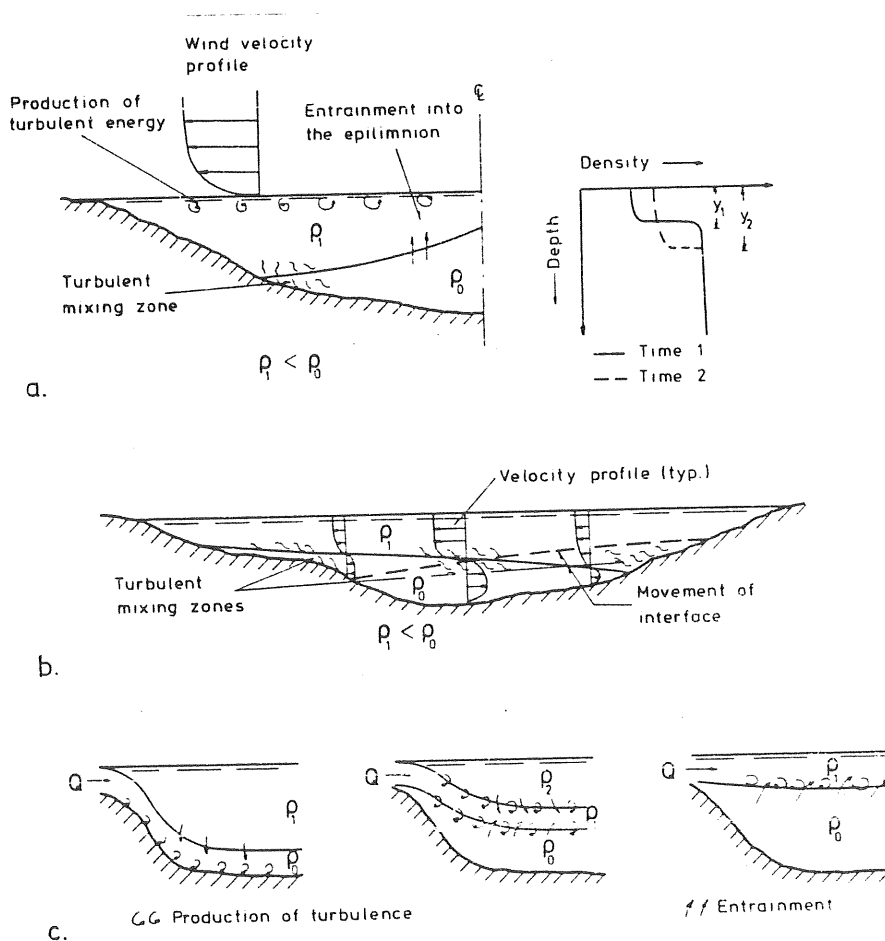


Fig. 26 Turbulence and Mixing in Stratified Lakes.  
 a) Windgenerated turbulent surface layer,  
 b) turbulence caused by inflow, and  
 c) turbulence caused by Seiche motions.

Den islagda periodens längd har stor betydelse för utnyttjandet av en sjö och dess sediment som värmekälla eftersom inget energitillskott från atmosfären eller solen kan påräknas under denna period. Tidpunkten för isläggningen varierar, förutom med geografisk belägenhet, med sjöns storlek, djup, bottenförhållanden och omgivande terräng. Islossningen sker däremot tämligen samtidigt oberoende av sjötyp. Normala tider för isläggning och islossning framgår av fig. 27. (Moberg 1967).

### 9.2. Vattnets rörelse i sedimenten

Mycket litet tycks vara känt om vattnets rörelse i sedimenten. En vertikal uppåtgående, långsam rörelse förekommer dock på grund av sedimentens kompaktering. För att beräkna strömförloppet i övrigt krävs kännedom om marklagrens utsträckning och permeabilitet såväl under sjön som i omgivande markområden samt botten-topografin och grundvattenytans lutning. Man kan förvänta sig att strömningen avtar ju längre från stranden man kommer.

### 9.3 Naturlig värmeomsättning i sjöar och sjösediment

Värmebalansen i en sjö bestäms av följande delposter (se Lind, Falkenmark 1972):

- 1) Strålning. Kort- och långvägigt strålningstubyte med atmosfären.
- 2) Fasomvandling. Isbildning, smältning resp. avdunstning, kondensering.
- 3) Ledning. Till eller från luften eller sedimenten.
- 4) Advektion. Tillrinning och avrinning via vattendrag och grundvatten.

Under sommarhalvåret är värmeomsättningen i en sjö många gånger större än under vintern. Instrålningen är den helt dominerande energikällan. Av den instrålade energin åtgår en liten del (försumbar i energibalansberäkningar) till uppvärmning av sedimenten. Temperaturen vid sedimentytan bestämmer hur stor värmemängd som lagras i sedimenten.

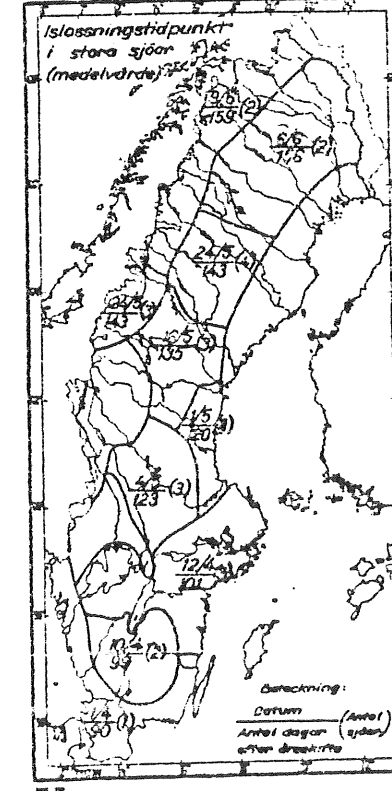
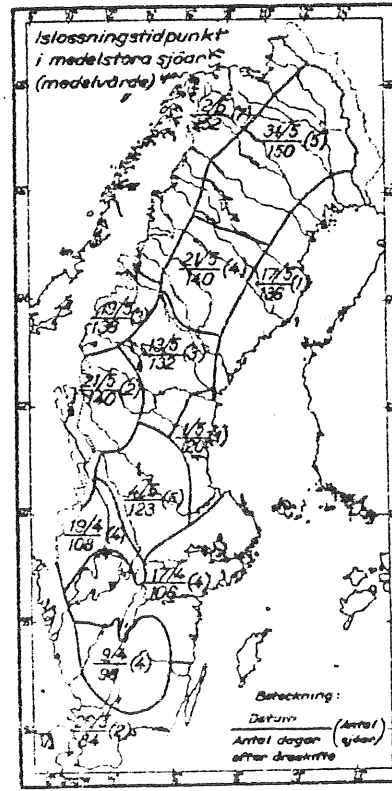
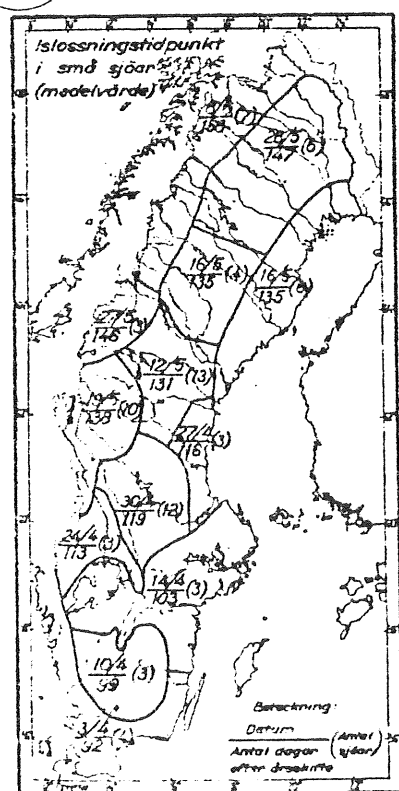
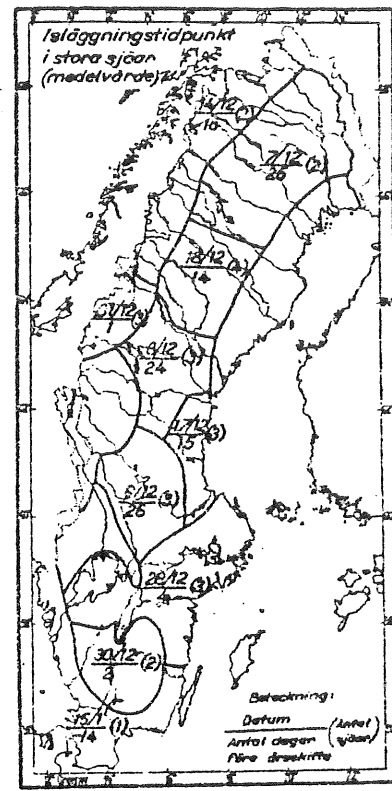
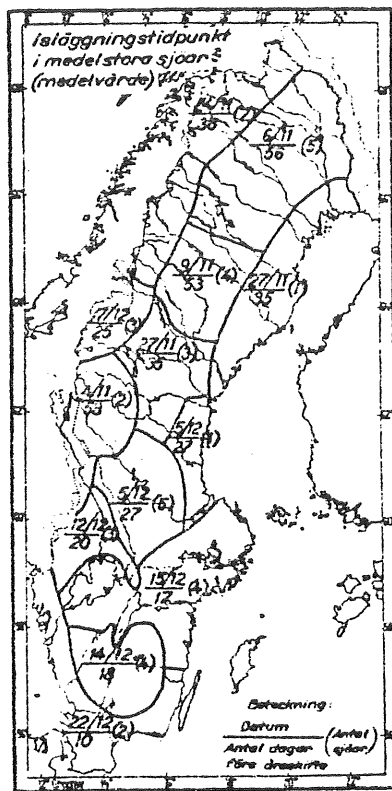
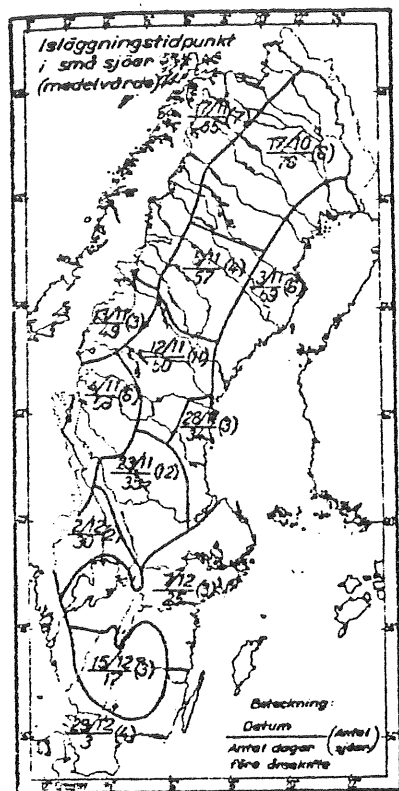


Fig. 27 Tidpunkter för isläggning och islossning.

Vattentemperaturens variation på olika djup under sommarhalvåret framgår av fig. 28 . Denna är hämtad från sjön Velen, som har ett största djup av 17 m, men den principiella utvecklingen är likartad i andra sjöar. Den högsta temperaturen uppnås på eftersommaren eller hösten, senare ju djupare man kommer. Temperaturamplituden avtar med djupet. Temperaturens nedträngning beror på ett flertal faktorer av vilka förutom instrålningen sjöns storlek och form samt vattnets genomskinlighet är de viktigaste (se Svensson 1978). Grunda sjöar är i stort sett temperaturhomogena under den isfria perioden. Värmeomsättningen, dvs skillnaden mellan största och minsta värmeinnehåll i sjövattnet uppgår till mellan 230 och 470 kWh/m<sup>2</sup> (Lind, Falkenmark, 1972 ) för relativt djupa sjöar på våra breddgrader. I grunda sjöar blir värmeomsättningen i vattnet i sett proportionellt med vattendjupet. För t.ex. en sjö med 3 m medeldjup och en årlig temperaturvariation av 20°C blir värmeomsättningen 70 kWh/m<sup>2</sup>.

Efter det att temperaturen på hösten sjunkit till +4°C i vattnet finns förutsättningar för att is skall bildas. Lufttemperaturen och vinden blir sedan avgörande för hur lågt vattentemperaturen skall sjunka. Tidig isläggning och lugnt väder innebär att stora värmemängder finns kvar i sjön vid vattentemperaturer av +3 - 4°C. Sen isläggning kombinerad med kraftig vindomblandning medför däremot att temperaturen kan sjunka till nära noll i en stor del av vattenmassan. Stora variationer föreligger således mellan olika år.

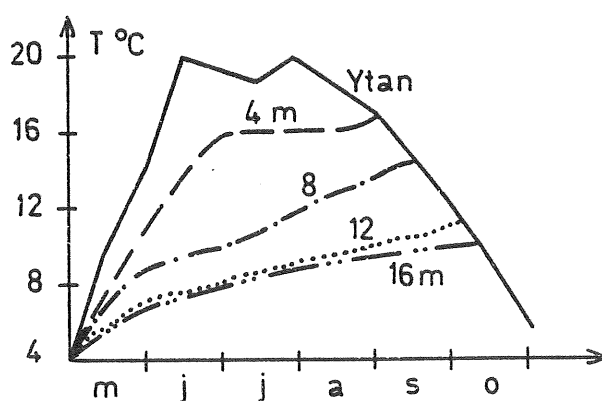


Fig 28. Temperaturen på olika djup i sjön Velen under sommarhalvåret.

Efter isläggningen ökar temperaturen i bottenvattnet långsamt p g a att den värme som magasinerats i sedimenten återgår till vattnet. Detta är speciellt märkbart i grunda sjöar där värmetransporten är stor i förhållande till vattenvolymen. Dessa sjöar blir därför relativt kraftigt skiktade under vintern.

I djupa sjöar ( $> 10$  m djup) sker huvuddelen av värmetransporten från de grundare liggande bottenarna, som värmts upp kraftigare än djupare bottenpartier. Uppvärmningen leder därför till att vattnet kan få högre densitet (nära  $+4^{\circ}\text{C}$ ) ovanför de grundare bottenarna än i övriga delar av sjön. Skillnaderna utjämnas genom densitetsströmmar som kan ge upphov till en storskalig cirkulation enl. fig. 29 .

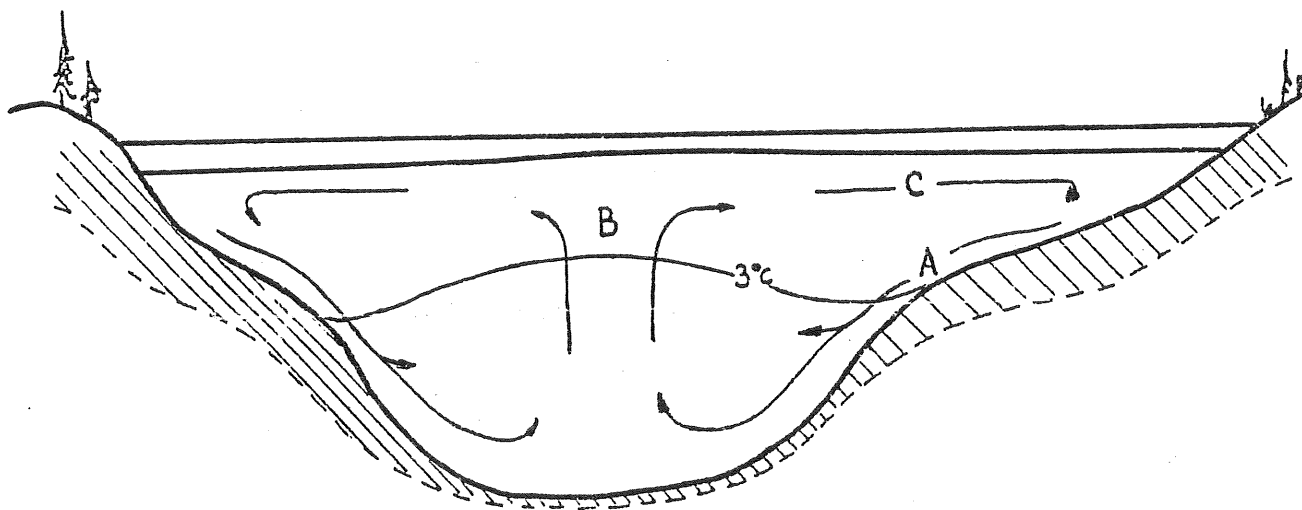


Fig. 29. Vintercirkulation genom uppvärmning av grundare partier.

Temperaturutvecklingen i sedimenten följer en årsvariation som framgår av fig. 30. Årsamplituden är störst vid sedimentytan, ungefär samma som i ovanliggande vatten, och avtar med djupet. Samtidigt sker en fasförskjutning av värmevågen, vilken uppgår till i storleksordningen 0,5 m per månad i lösa, organiska sediment. På tre meters djup i sedimenten erhålles alltså temperaturmaximum under vintern, jan - mars. Medeltemperaturen är samma som för vattnet ovan sedimentytan och uppgår till  $6 - 8^{\circ}\text{C}$ . Högst medeltemperatur uppnås i de grundaste, vanligen strandnära områdena. Härigenom kan grunden runt en sjö i strandzonen få högre temperatur än omgivningen, (Likens & Johnson, 1969).

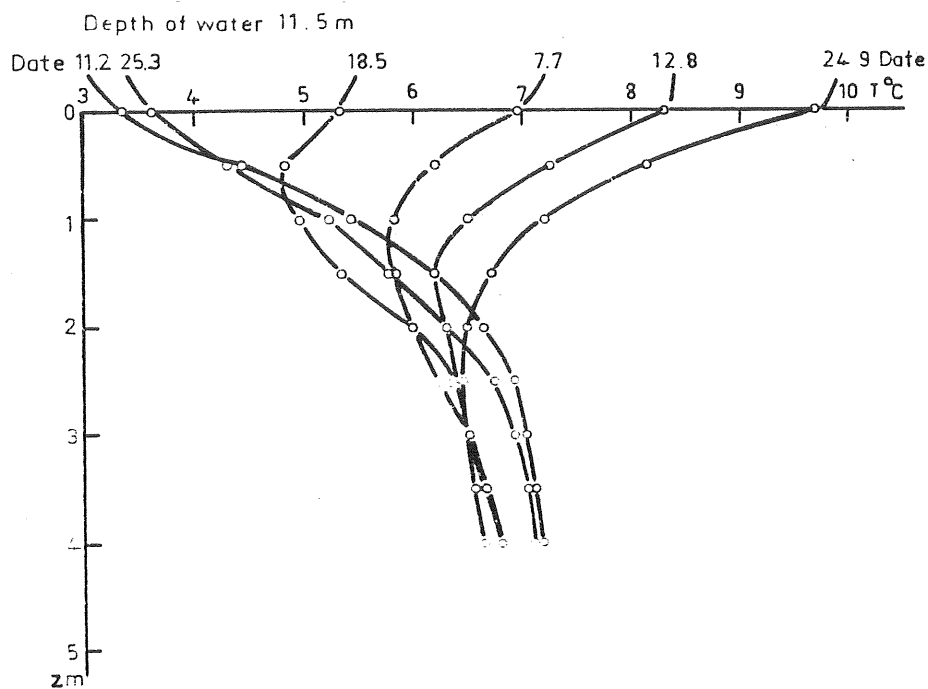


Fig. 30. Temperaturen i sedimenten på 11,5 m djup i sjön Velen.  
Efter Thanderz (1973)

Temperaturutvecklingen i sedimenten låter sig relativt enkelt beräknas under förutsättning att temperaturen vid sedimentytan och värmeledning och värmekapacitet är kända. Om botten temperaturen approximeras med ett sinusformat förlopp blir lösningen enl. följande:

$$T = T_a \cdot e^{-\sqrt{\frac{\sigma}{2k}} \cdot z} \cdot \cos(\sigma t - \sqrt{\frac{\sigma}{2k}} \cdot z + \delta) + T_m \quad (15)$$

där

$T_a$  är årstemperaturvägens amplitud vid botten

$$\sigma = 2\pi/3,15 \cdot 10^7 \quad [s^{-1}]$$

$$k = \lambda/\rho c \quad [m^2/s] \quad \text{temperaturledningstalet}$$

$T_m$  är medeltemperaturen

Ur ekv. (15) kan man härleda uttrycket för värmeomsättningen i sedimenten, dvs. skillnaden mellan största och minsta värmeinhåll. Denna blir:

$$Q_{\text{sed}} = \sqrt{\frac{2}{\pi} \cdot 3,15 \cdot 10^7} \cdot T_a \sqrt{\lambda \rho c} \quad [J/m^2] \quad (16)$$



Värmeomsättningen ger ett första mått på hur stor energimängd som kan tas ut ur en sjö med hjälp av värmepumpar. Ett flertal faktorer kommer att inverka på denna, främst sjöns storlek, djup och geografiska belägenhet samt sedimentens värmeledningsegenskaper. Med data för sjön Velen har man beräknat värmeomsättningen till  $20 \text{ kWh/m}^2$  på 0-1 m. djup minskande till  $10 \text{ kWh/m}^2$  på 10 m djup. I detta fall användes värmeledningsegenskaper motsvarande dem för rent vatten.

Värmeomsättningen ges alltså av temperaturamplituden och värmeomsättningsparametern  $\sqrt{\lambda \rho c}$ . Den senare beror av de geologiska förhållandena på platsen. För minerogena sediment kan parametern  $\sqrt{\lambda \rho c}$  beräknas utgående från porositeten och kvartshalten med den metod som angivits av Johansen (1972), (se även Modin 1979). För vattenmättade jordarter (sediment) är porositeten, vilken betecknas med  $p$ , lika med volymsandelen vatten, vattenhalten.

Då gäller:

$$\text{Värmeledningstalet } \lambda = \lambda_w^p \cdot \lambda_m^{(1-p)}$$

$$\text{Värmekapacitet } \rho c = (\rho c)_w \cdot p + (\rho c)_m \cdot (1-p)$$

Index  $w$  resp.  $m$  står för vatten resp. mineralkorn. För värmekapaciteten gäller tillnärmelsevis att  $\rho c$  är  $4.18 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3$  för vatten och  $2.23 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3$  för mineralkornen. Värmeledningstalet är  $0.56 \text{ W/mK}$  för vatten. Värmeledningstalet för mineralkornen varierar beroende på kvartshalten enligt följande:  $\lambda_m = 7.7^q \cdot 2.0^{(1-q)} \text{ W/mK}$ , där  $q$  är kvartshalten.

Uttrycken ovan kan kombineras för att beräkna värmeomsättningsparametern, vilken blir:

$$\sqrt{\lambda \rho c} = \sqrt{\lambda_w^p \cdot \lambda_m^{(1-p)} \left[ (\rho c)_w p + (\rho c)_m (1-p) \right]} \quad (17)$$

Ekv. 17 finns redovisad i fig. 31 varav framgår att värmeomsättningsparametern varierar mellan 1530 för rent vatten till 2000 - 3500 för sediment med 15-20% vattenhalt och med kvartshalt från 0 till 100%.

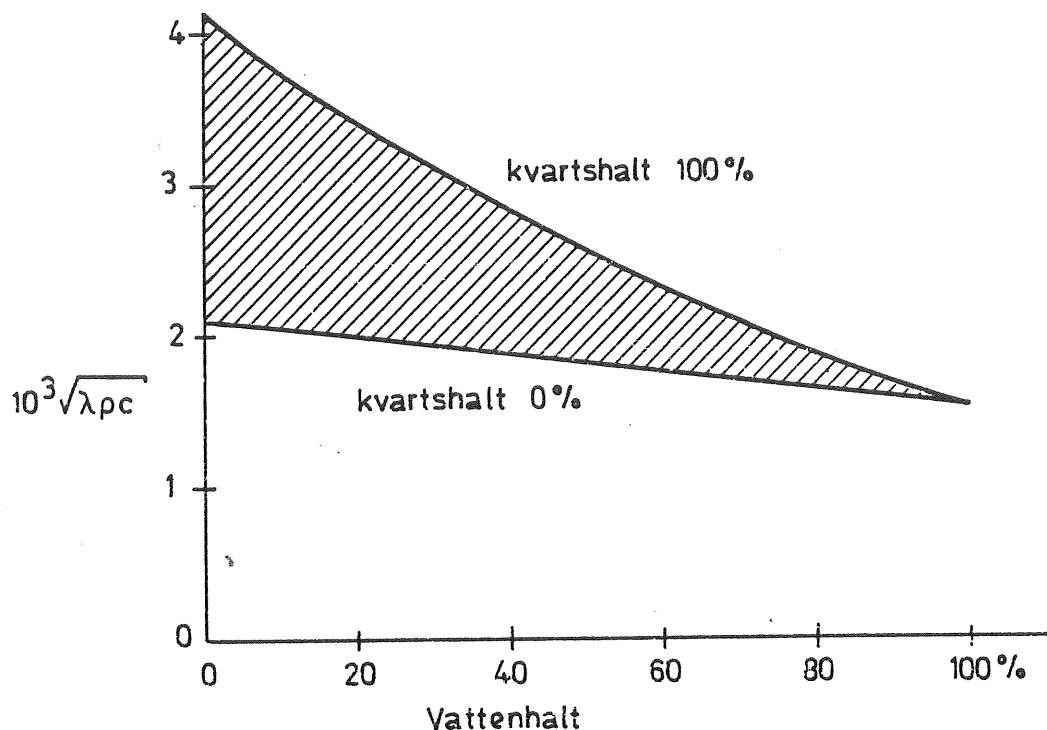


Fig. 31. Värmeomsättningsparametern  $\sqrt{\lambda \rho c}$  vid olika kvartshalt som funktion av vattenhalten.

Värmeflödet från sedimenten till vattnet är högst i början på vintern (efter höstomblandningen) och minskar sedan successivt. Mätningar i Velen visar att skillnaden mellan olika år är relativt stor. Ett representativt värde för senare delen av vintern på djup mindre än 6 m torde vara 2-3 W/m<sup>2</sup>. Detta värde ökar något om temperaturen i vattnet sänks genom ett värmeuttag.

En bedömning av möjligt värmeuttag samt ekologiska effekter av värmeuttaget blir baserad på den naturliga värmeomsättningen i vattnet och underliggande sediment. Hänsyn måste tas till att denna varierar kraftigt mellan olika, individuella sjöar liksom även mellan olika år. Stora avvikelser kan förekomma från de värden som angivits för sjön Velen. Så t.ex. har för Tub Lake (Liken&Johnson 1969) uppmätts en värmeomsättning av 42 kWh/m<sup>2</sup> i sedimenten vid strandlinjen sjunkande till endast 0.8 kWh/m<sup>2</sup> på största djupet, 8 m. Dessa värden betingas av att sjön är liten, vindskyddad och har litet siktdjup. En faktor som också kan ha viss betydelse är strålning genom isen, speciellt under senare delen av vintern. Hutchinson (1957) refererar till mätningar som tyder på att vinteruppvärmningen till så hög grad som 75% kan bero på denna strålning och endast till 25% av värmeledning från sedimenten. Det förefaller dock osannolikt att instrålningen har särskilt stor betydelse när isen är snötäckt vilket ju vanligen är fallet i Sverige.

## 10. Värmeuttag ur vatten-sediment

I detta kapitel behandlas värmeupptagningen från kylrör i vatten och sediment (fall a - e) under vissa idealiserade förhållanden samt värme- och vattentransporter vid pumpning av i sedimenten infiltrerat vatten (fall f).

En noggrann beräkning som tar hänsyn till aktuella randvillkor och värmeuttag, konvektionsströmmar och variabla värmeledningsegenskaper kräver avancerade lösningsmetoder som ligger utanför ramen för denna förstudie. De resultat som redovisas avser främst att användas för att jämföra olika systemlösningar samt att ange inom vilka gränser värmeuttaget kan variera.

De värmepumptillämpningar som finns i dag och som utnyttjar energi från sjöbottnar (el. motsvarande) tillämpar konventionell ytjordvärmeteknik och dimensioneras på samma sätt som dessa. Värmeväxlaren består där av polyetenslangar med en diameter av 40-50 mm. I det följande har därför, där ej annat anges, förutsatts en yttre slangdiameter av 50 mm. Beräkningarna finns detaljerat redovisade i appendix.

### 10.1 Radiell värmeledning genom slangvägg

Detta fall förutsätter att vattnet såväl utanför som innanför slangväggen är väl blandat och har konstant temperatur ända fram till väggen. Vid givna temperaturförhållanden svarar detta mot maximal tänkbar värmeupptagning. I praktiken kan detta fall endast tillnärmelsevis nås, och då i strömmande vatten där slangarna är fritt upphängda i vattnet. Med en temperaturskillnad,  $\Delta T$ , på slangar av PEH resp. PEL av olika tryckklasser:

$$\text{PEH} \quad Q = 36 \text{ till } 58 \cdot \Delta T \quad \text{W/m}$$

$$\text{PEL} \quad Q = 18 \text{ till } 27 \cdot \Delta T \quad \text{W/m}$$

Frostbildning på utsidan av slangarna ökar värmemotståndet avsevärt. Värmeflödet minskar därvid; alt. måste vätsketemperaturen inne i slangen sänkas för att erhålla samma värmeflöde. Ett realistiskt vintervärde på  $\Delta T$  kan sättas till  $2^{\circ}\text{C}$  vilket ger en maximal värmeupptagning av 40-60 W/m.

## 10.2 Radiell värmeledning i oändligt medium

Detta fall motsvarar värmeupptagning enbart genom värmeledning i det omgivande mediet, vilket förutsättes ha oändlig utsträckning. Värmet tas från omgivningen genom att dess temperatur sänks. På stort avstånd från den värmeupptagande slangen förutsättes temperaturen vara konstant. Kylvätskans temperatur (i slangen) antas vara konstant liksom värmeledningsförmåga och värmekapacitet hos omgivande medium (sediment). Två olika sedimenttyper behandlas, nämligen lösa organiska sediment (gyttja), vilka antas ha samma värmetransportegenskaper som vatten, samt lera med 65% porositet, se appendix 1.

Med dessa förutsättningar kommer värmeflödet att minska successivt under hela vinterperioden enligt fig. 32. Den relativa minskningen inom tidsperioden 2-6 månader efter start är dock ganska liten - ca 10 % för en slang med 50 mm diameter. Fig. 32 visar också att värmeflödet ökar med ökad slangdimension.

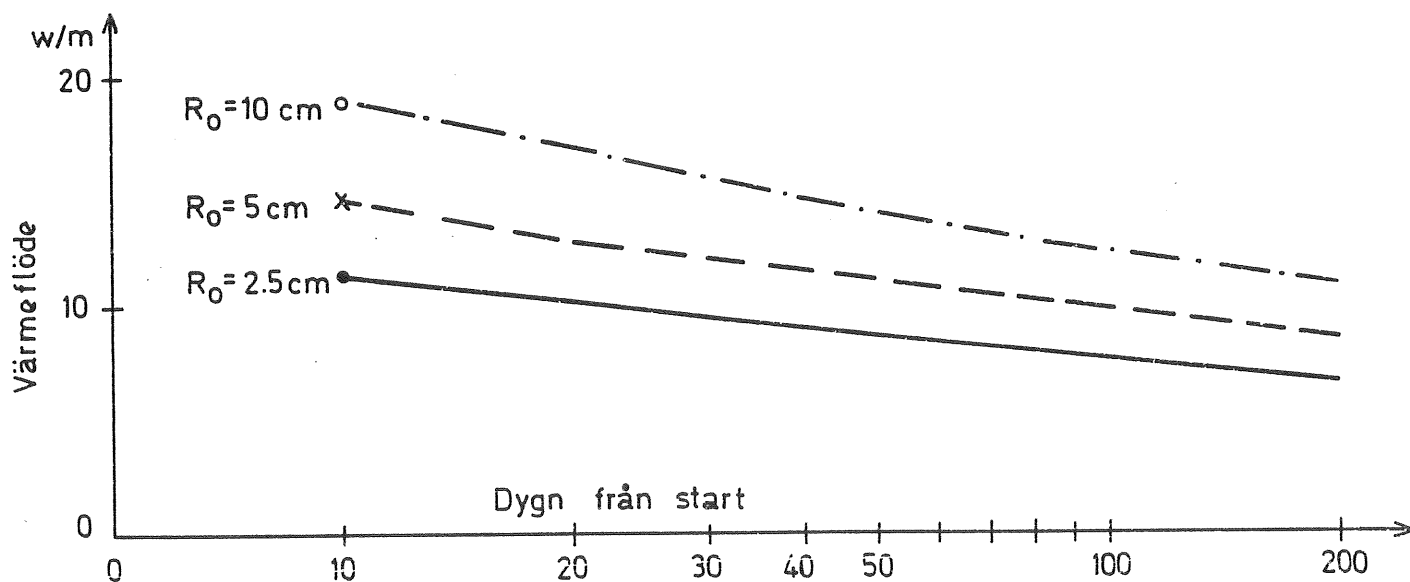


Fig. 32 Relativ värmeupptagning av kylslang med radien  $R_0$  i oändligt medium. Sedimenttyp lera. Konstant temperatur hos kylvätskan.

För den senare delen av tidsperioden erhålles följande medelvärde för värmeupptagningen:

$$\text{Gyttja} \quad Q = 0.9 \cdot \Delta T \quad \text{W/m}$$

$$\text{Lera} \quad Q = 1.4 \cdot \Delta T \quad - \text{''} -$$

Beräkningen leder till viss underskattning av värmeflödet p. g. a. att slangarna ligger nära sedimentytan och en viss värmetransport sker genom konvektion i vattnet ovanför och ev. även i porvattnet. I ett temperaturintervall nära  $+4^{\circ}$  är dock densitetsskillnaderna små och därmed också den termiska konvektionen. Den maximala temperaturdifferens som kan utnyttjas torde uppgå till ca  $6^{\circ}\text{C}$  vilket ger en värmeupptagning av 6-10 W/m beroende på sedimenttyp.

### 10.3 Värmeupptagning med frysning kring slang

Om slangen nedgräves i sedimentet kan man utnyttja den latent energi vid frysning för att höja energiuttaget per längdmeter. Detta sker på bekostnad av en sänkt värmefaktor. Vidare måste man säkerställa att den frusna sedimentvolymen inte blir lättare än vatten och riskerar att flyta upp samt att isen hinner tina under sommaren.

Beräkningen grundar sig på att allt porvatten fryser vid  $0^{\circ}\text{C}$  samt att omgivande sediment har oändlig utsträckning. Frysning sker radiellt. I den frusna delen ökar värmeledningsförmågan kraftigt jämfört med den ofrusna delen.

Vid ett konstant effektuttag kan man visa att radien,  $R_i$ , hos den frusna volymen ökar proportionellt med  $\sqrt{t}$ , medan temperaturen,  $T_o$ , hos kylvätskan i slangen sjunker. Temperatursänkningen är dock relativt sett långsammare än isfrontens rörelse.

I fig. 33 visas radien  $R_i$  och kylväsketemperaturen  $T_o$  vid tiden 100 dygn efter start som funktion av effektuttaget för sedimenttyperna gyttja (egenskaper som vatten) resp. lera. Sedimenttemperaturen antas vara  $+6^{\circ}\text{C}$ .

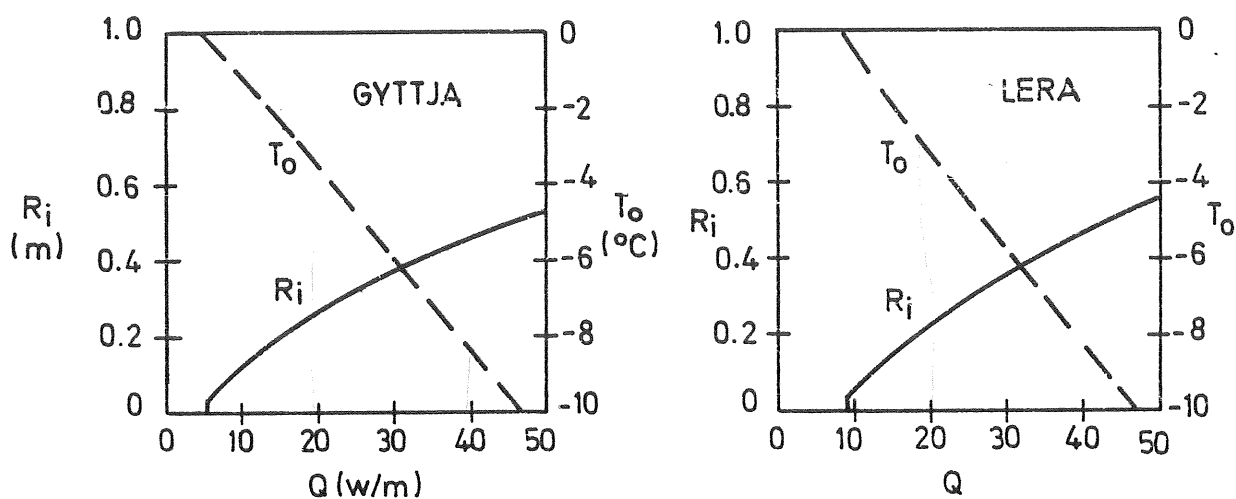


Fig. 33 Värmeupptagning vid frysning kring slang. Frusna volumens radie,  $R_i$ , och brinetemperaturen,  $T_o$ , som funktion av effekten vid tiden 100 dygn från start.

Som framgår av figuren blir radien och brinetemperaturen ganska lika i de båda fallen, speciellt vid höga effektuttag. Fördelningen av värmeupptaget på frysning resp. ledning från omgivningen är däremot ganska olika i de båda fallen. I gyttja (vattenrika organiska sediment) svarar frysningen för 32 % vid  $Q = 15 \text{ W/m}$  och 50 % vid  $Q = 30 \text{ W/m}$ . Motsvarande värden för lera är 10 resp. 35 %.

Med hänsyn till att isen skall kunna smälta under sommaren och att medeltemperaturen i sedimenten ej skall bli för låg torde i fallet gyttja effektuttaget få begränsas till i storleksordningen 20-25 W/m vilket svarar mot en brinetemperatur av  $-3,5 - (-5)^{\circ}\text{C}$ . I lera är kravet på upptining mindre kritiskt och det maximala effektuttaget begränsas snarare av att brinetemperaturen ej får bli alltför låg.

Frysning av porvattnet i vattenmättad jord är emellertid en betydligt mera komplicerad process än vad denna beräkning kunnat ta hänsyn till. I lera kan ännu vid en temperatur av  $-5^{\circ}\text{C}$  en stor del av vattnet vara ofruset. Isbildningen skapar vidare ett undertryck i isfronten vilket i vissa jordarter leder till bildning av islinser som kan leda till tjällyftning m. m. Den beräknade värmeupptagningen, speciellt för lera, får därför tas med viss reservation.

10.4 Termisk konvektion vid kylning med bottenförlagda slangar

Genom kylning blir vattnet intill slangarna kallare än omgivningen och får därigenom en avvikande densitet. Gravitationsströmmar uppstår som strävar att utjämna densitetsskillnaderna och återställa en stabil densitetsprofil i vilken densiteten ökar med djupet. Flera olika strömningsförlopp är möjliga, främst beroende av om temperaturen i den ostörda vattenmassan ligger under  $+4^{\circ}\text{C}$  (vinterskiktning) eller över  $+4^{\circ}$  (sommarskiktning). Den starka olineariteten hos temperatur-densitetskurvan omkring  $+4^{\circ}\text{C}$  gör det svårt att beräkna konvektionsströmmarna och den därav betingade värmetransporten. Konvektionen har stor betydelse för värmetransporten både när slangarna ligger på sedimentytan och när de är nedgrävda.

I vinterskiktat vatten kommer man att få en vertikal ström från kylröret upp till en bestämd stighöjd som beror av temperaturprofilen. Strömningen

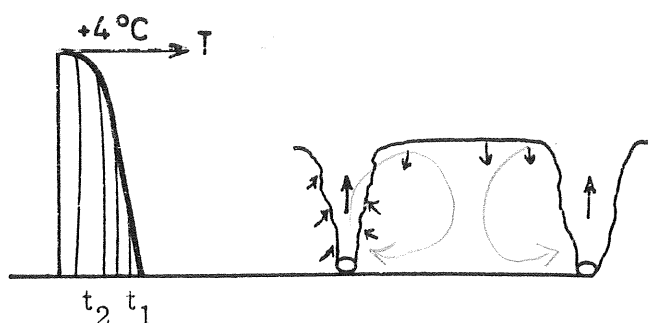


Fig. 34 Konvektion vid vinterskiktning.

kan ske i form av laminära eller turbulenta plynar enligt fig. 34. Härigenom torde man få en homogenisering av den undre delen av temperaturprofilen. Om värmeuttaget överstiger värmeflödet från sedimenten kommer temperaturen i vattenmassan att sjunka. Värmeupptagningen från

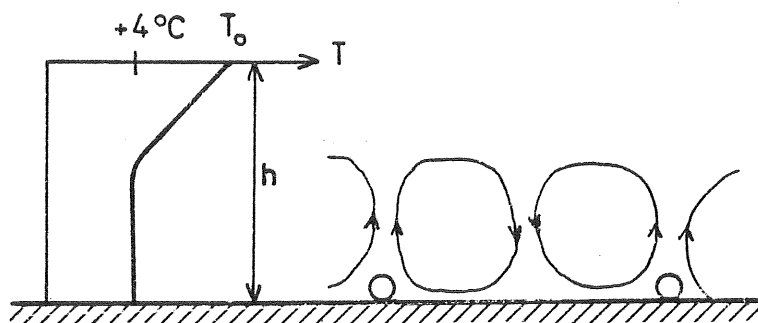
vattnet kommer därvid automatiskt att inställa sig till samma värde som värmeflödet från sedimenten. Värmebehov därutöver tillgodoses genom isbildning kring slang.

Uppgifter om konvektionsförloppet och därav betingad värmeöverföring, brinetemperatur och isbildning har ej kunnat erhållas inom ramen för denna förstudie. Man kan jämföra med en vertikal skiva med höjden  $H$ , för vilken den termiska konvektionen finns behandlad av Turner (1973). Häri visas att värmeflödet relativt värmeledningen är proportionell mot  $(\Delta\rho H^3)^{1/4}$ . Höjden  $H$  (motsvarande diametern på en bottenförlagd slang) är således en mycket viktig parameter. Värmeutbytet skulle således

kunna ökas avsevärt med hjälp av vertikala flänsar, men detta torde inte vara möjligt att praktiskt genomföra. Turner visar också att strömningen i plymen blir laminär med de parametervärden som gäller i vårt fall.

I sommarskiktat vatten med temperatur över  $+4^{\circ}\text{C}$  leder kylningen till att vattnets densitet ökar. Om botten sluttar kan detta vatten av egen tyngd rinna ner i djupare delar av sjön och temperaturen hålls då över  $+4^{\circ}\text{C}$ . Vid horisontell botten eller i ett avgränsat djupområde (grop) blir skiktningen helt stabil och den vertikala värmetransporten sker enbart genom ledning. Vid större värmeuttag sjunker temperaturen vid botten då till under  $+4^{\circ}\text{C}$ , varvid man får konvektionsceller med utseende enligt fig. 35.

Fig. 35. Konvektionsceller vid sommarskiktning



Inom konvektionsområdet blir temperaturen konstant,  $+4^{\circ}\text{C}$ , utom allra närmast slangarna. Några uppgifter om värmetransportens storlek har ej hittats i litteraturen. För ett likartat problem där temperaturen på hela bottenytan hålls vid  $0^{\circ}\text{C}$  har Musman (1968) visat att värmeflödet ökar relativt ren värmeledning proportionellt med  $h/T_0$ .

I havsvatten blir förhållandena annorlunda än för sötvatten. Temperaturen för densitetsmaximum sjunker relativt fryspunkten för att vid 25 ‰ salt-halt vara lika med fryspunkten. Om vattnet är saltare än 25 ‰ kan termisk instabilitet över huvud taget ej uppstå vid kylning och vid 20 ‰ salt-halt, vilket är vanligt på västkusten, är densitetsskillnaderna så små mellan täthetsmaximum och fryspunkt att konvektionen blir synnerligen svag. Salthalten ökar i regel med djupet inom de djupintervall som är aktuella. Genom att densiteten påverkas betydligt kraftigare av ändrad salt-halt än av ändrad temperatur hindras av denna anledning termisk instabilitet, och därav betingad värmetransport, att uppkomma. I havsvatten är man således hänvisad till horisontella strömmar och turbulens för värmetransport till slangar eller andra typer av värmeväxlare.



### 10.5 Värmeupptagning genom uppumpning av vatten från sedimenten

Metoden bygger på att vatten infiltreras ned genom sedimenten till en uttagspunkt eller en horisontell uttagsledning på några meters djup. Infiltrationshastigheten avpassas så att man får sex månaders fasförskjutning på temperaturen hos sjövattnet och det uppumpade vattnet. Under vintermånaderna har man således den högsta temperaturen hos det vatten som används som värmekälla, vilket medför en hög årsvärmefaktor. Energi för pumpningen måste dock tillföras hela året, vilket begränsar användningen till relativt vattengenomsläppliga sediment.

Anläggningen bör utformas så att strömningstiden från sedimentytan till uttagspunkten blir så likformig som möjligt inom hela flödet. Detta innebär att uttagen placeras så tätt att de samverkar med varandra som visas

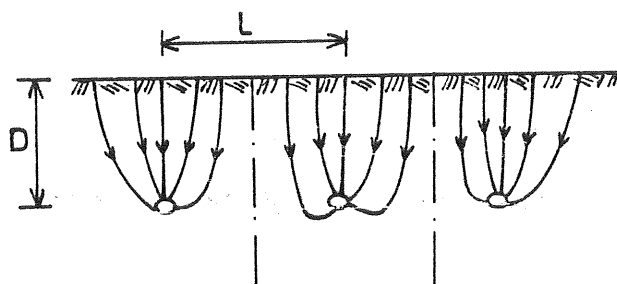


Fig. 36 Samverkande uttag.

i fig. 36. Det går sannolikt att finna ett optimalt förhållande mellan djupet  $D$  och avståndet  $L$ . För att inte värmeförlusterna genom ledning skall bli för stora krävs att uttagsdjupet  $D$  är tillräckligt stort, uppskattningsvis större än 6 m.

Effektuttaget beror av det vattenflöde man pumpar upp och den temperatur-sänkning man kan tillgodogöra sig i värmepumpens förångare. Den senare har satts till  $10^{\circ}\text{C}$ . Flödet bestäms i första hand av uttagsdjupet,  $D$ . Om förhållandet mellan  $D$  och  $L$  hålles konstant gäller att:

$$\begin{array}{ll} \text{Flödet/längdenhet} & \sim D^2 & \text{för linjeuttag} \\ \text{Flödet/brunn} & \sim D^3 & \text{för punktuttag} \end{array}$$

Uttagsdjupet bör således göras så stort som möjligt med hänsyn till geologiska begränsningar. Den relativa pumpeffekten ökar proportionellt med flödet, vilket gör att ett större uttagsdjup ställer krav på högre permeabilitet. I första hand ges dock minimikravet på permeabiliteten av att undertrycket på pumpens sug sida ej får bli för stort, se appendix 4 c.

Värmeuttag, flöde och erforderlig permeabilitet har beräknats approximativt för uttag på 6 m djup i ett material med 35% porositet. Resultatet framgår av följande tabell:

		Flöde	Värme- uttag	Permea- bilitet
Punktuttag,	L = 12 m	$1.6 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$	ca 400 W	$>3 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$
- " -	L = 6 m	$4.1 \cdot 10^{-6} \text{ "-}$	170 W	$>5 \cdot 10^{-7} \text{ "-}$
Linjeuttag	L = $\infty$	$2.5 \cdot 10^{-6} \text{ "-}$	100 W/m	$>2 \cdot 10^{-7} \text{ "-}$
- " -	L = 12 m	$1.9 \cdot 10^{-6} \text{ "-}$	80 W/m	$>2 \cdot 10^{-7} \text{ "-}$

Permeabilitetskravet motsvarar jordarten finmo eller sandig morän. I sandiga sediment kan uttagsdjupet och värmeuttaget ökas kraftigt. Med ett punktuttag av typ b) kan man vid en permeabilitet av  $10^{-5} \text{ m/s}$  erhålla en värmeeffekt av 5 kW vid ett uttagsdjup av 19 m.

Energiuttaget per ytenhet av vattenområdet blir proportionellt mot uttagsdjupet, porositeten och temperatursänkningen. Med  $p = 35 \%$ ,  $\Delta T = 10^\circ\text{C}$  och  $D = 6 \text{ m}$  erhålles ett energiuttag av  $25 \text{ kWh/m}^2$  vilket är i samma storleksordning som den naturliga värmeomsättningen i mera vattenrika sediment. Ökas uttagsdjupet till 15 m erhålles  $62 \text{ kWh/m}^2$ .

11. EKOLOGISKA EFFEKTER AV SEDIMENTVÄRME-  
UTNYTTJANDE

Erik Degerman

Fiskeriintendentkontoret i västra distriktet  
Box 2566, 403 10 GÖTEBORG

- 11.1 Sammanfattning
- 11.2 Direkta effekter av ändrad temperatur på flora och fauna
  - 2.1 Allmänna effekter på organismerna
  - 2.2 Effekter på cellnivå
  - 2.3 Effekter på bakterier
  - 2.4 Effekter på bottendjur
  - 2.5 Effekter på växter
  - 2.6 Effekter på växt- och djurplankton
  - 2.7 Effekter på fisk
- 11.3 Effekter på organismerna av isbildning i sedimenten
- 11.4 Effekter av ändrad temperatur på organismernas miljö  
och konsekvenserna för fauna och flora
  - 4.1 Påverkan av vattnets syreinhåll
  - 4.2 Effekter av temperaturen på olika ämnens  
toxicitet
- 11.5 Toxicitet hos kylvätskan
- 11.6 Effekter på fiskets utövande
- 11.7 Effekter av anläggningsarbete
- 11.8 Kortfattad summering av olika värmesystems effekter på  
det akvatiska ekosystemet
- 11.9 Referenser

### 11.1. Sammanfattning

Temperaturen är den viktigaste omvärldsfaktorn för de akvatiska organismerna. Redan ändringar av ett vattenområdes medeltemperatur med en grad kan få vittgående följder för artsammansättningen och individantalet hos akvatiska djur.

Temperaturen påverkar metabolism, hjärtverksamhet, aptit, digestion, tillväxt, aktivitet, reproduktion och migrationsbeteenden hos akvatiska djur. Påverkan är oftast märkbar redan vid små temperaturförändringar. Ytterst påverkar temperaturen ett vattenområdes produktion.

Sålunda kan förutsägas att sedimentvärmeanläggningar kommer att påverka de akvatiska ekosystemen. Bli temperaturhöjningarna i storleksordningen några grader kommer fauna och flora att förändras samtidigt som produktionen ökar. Bli sänkningen av temperaturen i samma storleksordning ändras också organism-sammansättningen medan produktionen minskar. En temperatur-sänkning skulle sålunda ha gynnsam effekt på eutrofierade vattensystem.

Temperaturändringar påverkar förutom produktionen även sedimentens kemi. Återcyklingen av organiskt material, syrenivåer, pH, redoxpotentialen, kretslopp av närsalter, toxicitet och ackumulering av tungmetaller beror intimt av miljöns temperatur.

Effekterna på flora och fauna torde bli större i sötvatten än i saltvatten. Detta beroende av att sötvattnen med sin mindre vattenvolym har en mindre reserv av organismer som kan återkolonisera ett **stört** område. En utslagning av faunan i limniska system kan lätt bli permanent.

Sedimentvärmsystem borde gå att förena med ett friskt och normalt fungerande akvatiskt ekosystem. För att kunna ge anvisningar om hur detta skall utformas måste en konkret problemanpassad forskningsinsats göras.

## 11.2. Direkta effekter av ändrad temperatur på flora och fauna.

### 11.2.1 Allmänna effekter på organismerna.

Temperaturen är den viktigaste omvärldsfaktorn för de akvatiska organismerna, medan terrestra organismers liv styres av ett flertal lika viktiga omvärldsfaktorer, såsom vattentillgång, fotoperiod, temperatur etc. (Lehmkuhl, 1974). Grimås (1974) skriver att förhållandena mellan livsfunktionerna och temperaturen är sådana att redan en liten ändring av ett mediums temperatur får stora effekter på organismerna. Härav följer att en ändring av sediment- och vattentemperatur kommer att få stora och svåröverskådliga konsekvenser för det akvatiska ekosystemet.

Temperaturförändringar kommer att verka dels direkt på flora och fauna, samt dessutom påverka vattenkemin och därmed sekundärt påverka de akvatiska organismerna.

Den direkta påverkan av organismerna hänför sig huvudsakligen till följande punkter;

#### ÄNDRAD TEMPERATUR MEDFÖR:

- ° påverkan på metabolismen
- ° ändrad hjärtrytm hos djur
- ° ändrad aptit
- ° ändrad digestion
- ° ändrad tillväxt
- ° ändrad sim-hastighet och aktivitet.
- ° reproduktionen påverkas
- ° migrationsbeteenden påverkas

En samverkan av dessa faktorer kommer sedan att begränsa utbredningen av de olika organismerna.

De sekundära effekterna uppkommer då en temperaturändring påverkat de fysikaliska och kemiska parametrarna, såsom pH, syre, redoxpotential, svavelvätebildning, vattenströmmar, isbildning och olika ämnens kretslopp.

### 11.2.2 Effekter på cellnivå.

Temperaturändringar påverkar hastigheten hos de biokemiska processerna. En sänkning av temperaturen i sediment eller vatten med tio grader innebär att de biokemiska processernas hastighet halveras. Detta påverkar alltså organismers kataboliska (nedbrytande) och anaboliska (uppbyggande) processer, dvs tillgodogörandet av den intagna näringen och därmed åtföljande tillväxt hos organismerna avtager.

Ändrad temperatur medför även att affiniteten mellan ett enzym och dess substrat påverkas. Om temperaturen sänks ökar affiniteten, vilket innebär att enzymet får lättare att arbeta.

Vissa typer av enzym finns dock i flera varianter med olika temperaturoptima. Alaskas kungskrabba (*Paralithodes camtschatica*) har två varianter av enzymet Pyruvat kinas (PyK), det ena med ett temp.-optima kring 5 °C och det andra med ett optima kring 12 °C. Detta innebär att omvandlingen mellan glukos och pyruvat är optimerad vid två helt skilda temperaturer (Hochachka och Somero, 1962).

Trots att poikilothermernas (de kallblodiga eller växelvarma djuren) enzym oftast är temperaturberoende kan regleringen av vissa enzyms aktivitet vara oberoende av temperaturen inom mycket stora intervall.

Enzym är också känsliga för andra faktorer än temperaturen. De sekundära effekter som kan uppstå i form av ökad omsättning av tungmetaller och ändringar i pH kan få allvarliga konsekvenser på cellnivå.

Effekterna på celler av en temperaturändring är komplexa och svåra att särskilja.

Lövstrup (1976) konstaterar att det är membranfetterna som är begränsande faktorn för temperaturtolerans. Vid prefererad temperatur är dessa fetter i kristallform och har då till uppgift att reglera diffusionen genom cellmembranerna. Om temperaturen sjunker för lågt stelnar dessa fetter respektive smälter vid för hög temperatur och kan alltså inte fungera.

### 11.2.3 Effekter på bakterier.

Mikroorganismer (bakterier, mikroalger, djurplankton och små bottendjur ) påverkas genom sin litenhet och avsaknad av temperaturreglering snabbt av ändringar i miljöns temperatur. Effekterna på dessa djur och växter påverkar sedan hela ekosystemet, emedan de utgör näringspyramidens bas i hav, sjöar och vattendrag. Flertalet av de större bottendjuren och fiskarna tillbringar delar av sin uppväxt som medlemmar i plankton och som bottendjur

. Även detta bidrar till att påverkan av de minsta djuren sedemera påverkar hela ekosystemet.

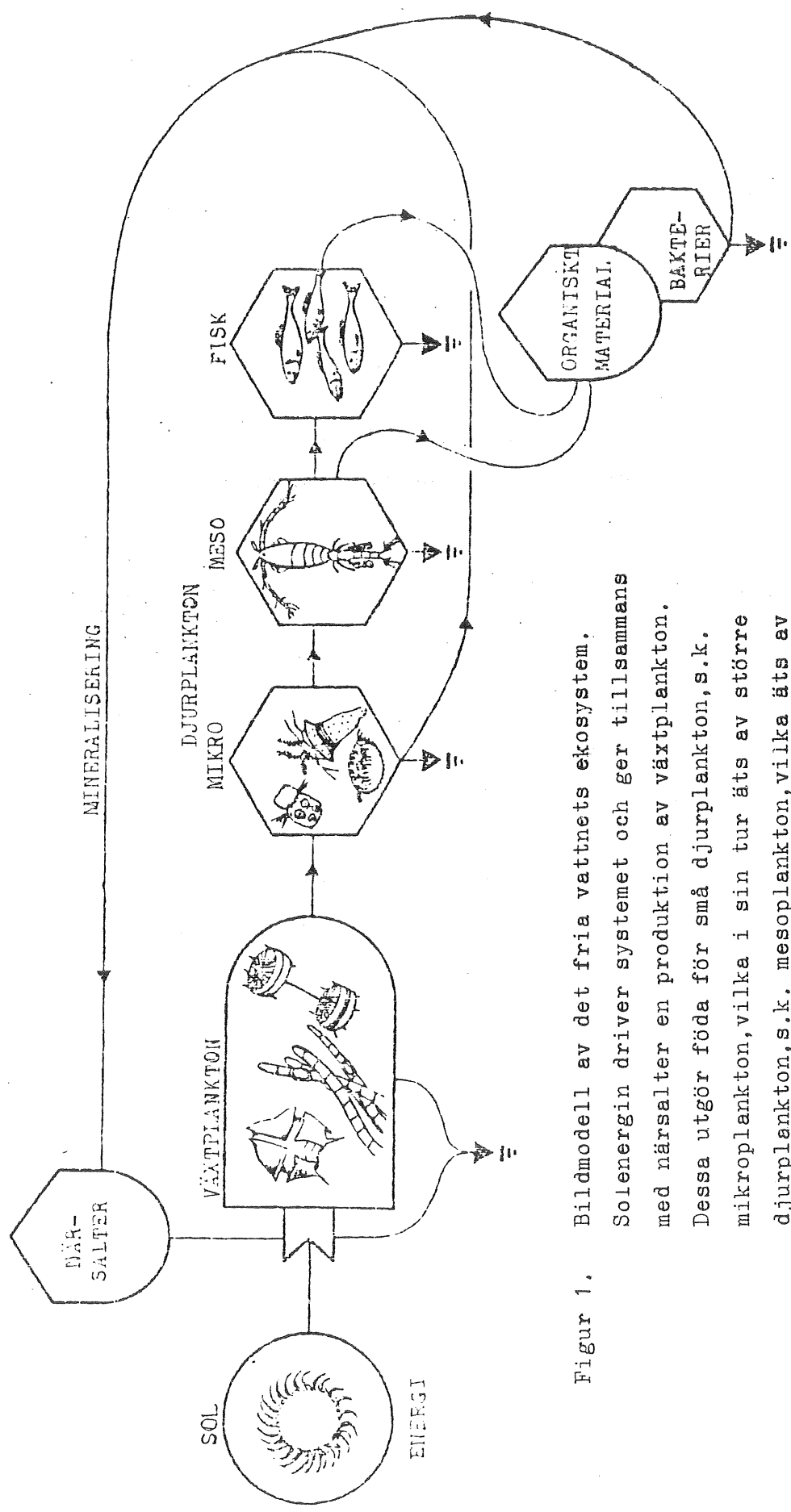
Bakterier är den organismgrupp som lättast anpassar sig till förändrad miljö. Detta beror främst av att de har kort generationstid och därmed snabbare kan förändra sin arvs massa så att de kan trivas i en ny miljö. Bakterier existerar härför inom i stort sett alla vattensystem på jorden. Varje miljötyp har den bakteriepopulation som är bäst anpassad till de rådande förhållandena. Dessa populationer är uppbyggda av olika arter i skilda miljöer, men även av specialanpassade varianter av enskilda arter.

Bakterier lever i det fria vattnet och går även ned djupt i sedimenten. I sedimentens översta fem centimeter är antalet bakterier högt för att sedan avtaga logaritmiskt mot djupet. Ännu flera meter ned i sedimenten, betydligt djupare än någon annan organismgrupp, lever bakterierna, om än i liten numerär (Hayes och Anthony, 1959).

Bakterier intar en nyckelroll i de akvatiska ekosystemen eftersom de har hand om nedbrytningen av döda organismer. Härigenom bestämmer aktiviteten hos bakterier en mängd essentiella miljöfaktorer för övriga akvatiska organismer. Olika ämnens kretslopp, syrgasförhållanden, pH, svavelvätebildning och omsättning av organiskt material är sålunda beroende av bakteriernas aktivitet (se figur 1.).

Tillväxten hos bakterier är direkt beroende av temperaturen om näring finns att tillgå (figur 2). Detta innebär att generationstiden förkortas vid högre temperaturer (figur 3), vilket medför att bakterierna snabbare kan adaptera sig.

Tillväxt hos marina bakterier har visat sig ske även vid temperaturer under noll grader Celsius. Hess, 1934a, konstaterade tillväxt ända ned till  $-7.5^{\circ}\text{C}$ .



Figur 1. Bildmodell av det fria vattnets ekosystem.

Solenergin driver systemet och ger tillsammans med närsalter en produktion av växtplankton.

Dessa utgör föda för små djurplankton, s.k.

mikroplankton, vilka i sin tur äts av större

djurplankton, s.k. mesoplankton, vilka äts av

fiskar. För varje steg i näringskedjorna sker

energiförluster, b.l.a. i form av värme, vilket

markeras med en pil under symbolerna. Alla grupper

leder vidare till döda organismer, "organiskt

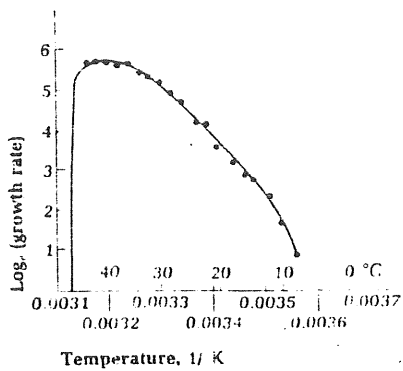
material", och bryts ned av bakterier. Cirkeln sluts

i och med att närsalter återskapas genom mineralisering.

Ur Fysisk Riksplanering nr 5, 1978 "Marin ekologi,

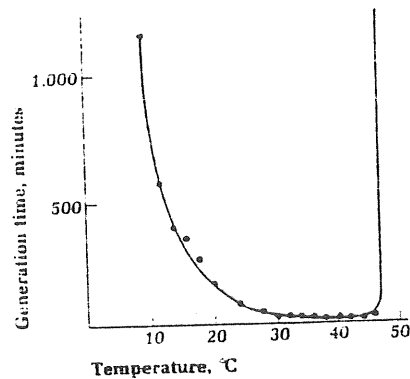
sedimentologi och marina miljöföroreningar".





Figur 2. Temperaturens inverkan på tillväxthastigheten hos *E. coli*, en typisk mesofil (se tab 1 nedan) bakterie.

Ur "General microbiology", 1971. Stainer et al..



Figur 3. Diagram av förhållandet mellan temperatur och generationstid.

Ur samma källa som vidstående diagram.

Huruvida det finns en flora av rent köldälskande bakterier (psykrofila arter) eller om det är frågan om en adaptation av arter som normalt har tillväxt vid högre temperaturer är ännu ej klarlagt. Lochhead (1924 och 1926) och Gubitz (1928) anser att en psykrofil flora ej är för handen, medan Gibbons (1934) och Hess (1934a) anser sig ha funnit psykrofila arter. Stainer, Doudoroff och Adelberg (1971) föreslår dock en indelning av bakterier i tre olika grupper med avseende på förhållandet mellan temperatur och tillväxt (tabell 1).

GRUPP	TEMPERATUR, °C		
	Minimum	Optimum	Maximum
Termofiler	40-45	55-75	60-80
Mesofiler	10-15	30-45	35-47
Psykrofiler, oblig. (-5)-(+5)		15-18	19-22
"-", fakul. (-5)-(+5)		25-30	30-35

Tabell 1. Principiella fysiologiska bakteriegrupper med avseende på förhållanden mellan tillväxt och temperatur. Ur "General microbiology", 1971 Stainer et al..

Enligt denna indelning finns det bakterier som är rent köldälskande (obligat psykrofila) och arter som kan anpassa sig till låga temperaturer vid behov.

Guthrie, Cherry och Ferebee (1973) visade att bakterier gynnades i en sjö som mottog varmvatten och därvid fick högre medeltemperatur. Under perioder med en temperaturförhöjning av 3-5 °C över normalmedeltemp. ökade totalantalet bakterier. Vid en höjning med 5-10 °C förekom dock en reduktion av antal arter och individer.

Rankin, Buck och Foerster (1974) rapporterade att bakteriefloran i en flod, Connecticut-floden, som mottagit utsläpp av varmt vatten mellan 5-10 °C över flodvattentemperaturen, endast förändrats lokalt kring själva utsläppspunkten. Effekter av ett värmeutsläpp i rinnande vatten blir mindre då vattnet med förhöjd temperatur snabbt blandas med recipientvattnet.

Temperaturen påverkar även bakteriernas morfologi. Arten *Bacillus vulgatus* visade varaktiga förändringar i längd under perioder med låg temperatur (=låg tillväxt). I kallt vatten tenderade bakterien att bli längre, en effekt som kvarstod längre ju lägre temperaturen varit (Hess, 1934b).

Bakteriers förmåga att anpassa sig till en ändrad miljötemperatur beror huvudsakligen av; Bakterieart eller ras, adaptationstid, medium i vilket bakterien vistas, storlek på temp.-ändringen och ändringens varaktighet (Hilliard, Torrision och Stone, 1915).

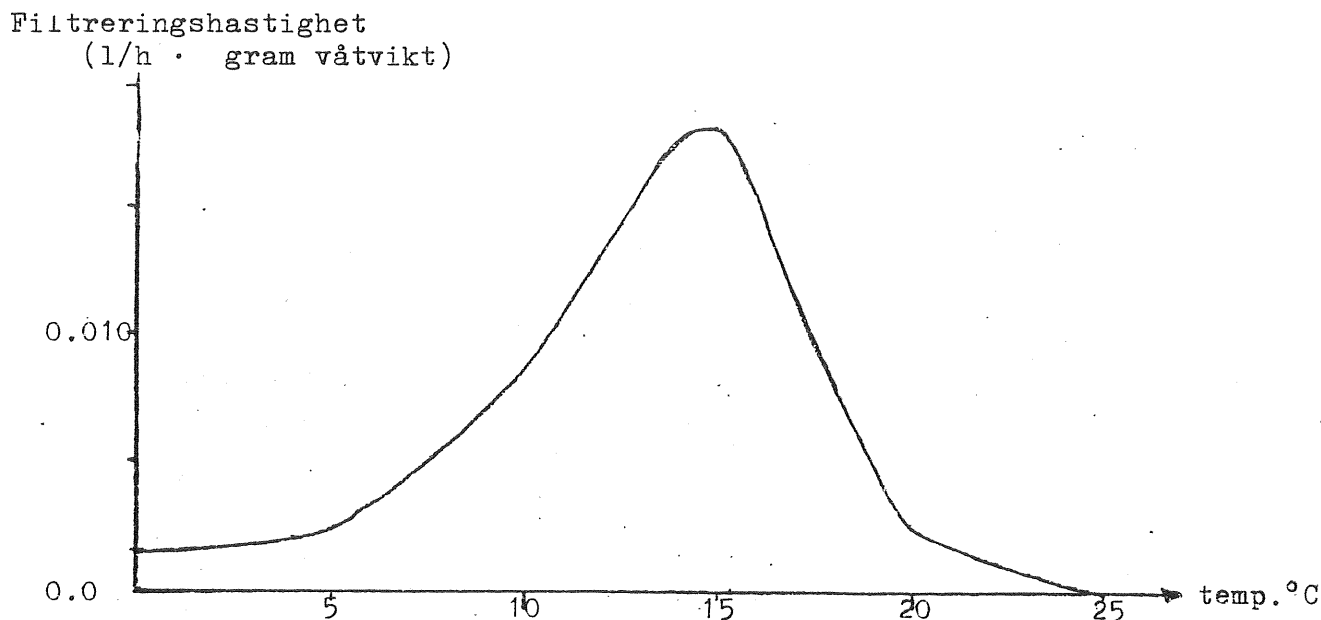
#### 11.2.4 Effekter på bottendjur.

Till bottendjur räknas här alla arter av djur som lever i eller omedelbart på botten. Liksom hos övriga organismgrupper innebär en förändring av mediumets temperatur omedelbara och stora förändringar på alla livsfunktioner.

Bottendjuren lever i regel sällan djupare än tio centimeter ned i sedimenten, undantaget djur med långa rör för närings- och syretransport. Ankar (1969) fann i Östersjön inga djur djupare ned i sedimenten än sju centimeter. I saltare vatten tillkommer en del musslor vilka med hjälp av sina sifoner, långa rörliknande utväxter, kan suga ned syre och näring och därigenom kan existera djupt ned i sedimenten. Sandmuslan (*Mya arenaria*) lever som ung helt nära sedimentytan, men gräver efterhand som den blir större ned sig i botten. Vid 10 års ålder kan den befinna sig 40 centimeter ned i botten (Christensen et al., 1979). Begränsande för djurens vertikalutbredning i botten är främst syretillgången. I sandiga botten kan syretillgången vara tillräcklig flera decimeter ned i botten, medan botten med fint material och hög organisk halt kan vara syrefria ända upp till ytskiktet. Bottendjuren utgör ofta föda för frisimmande djur.

Bottendjuren svarar för en kontinuerlig bearbetning och kringtransport av sedimenterat material. Denna så kallade bioturbation liknar till stor del den aktivitet som dagmaskar utför i våra terrestra mulljordar. Bioturbationens gräns nedåt i botten var i Ekoln, en mellansvensk insjö, 8-12 centimeter och i Vänern 5-10 centimeter (Håkansson, 1978), i marin miljö kan stora djur gräva betydligt djupare.

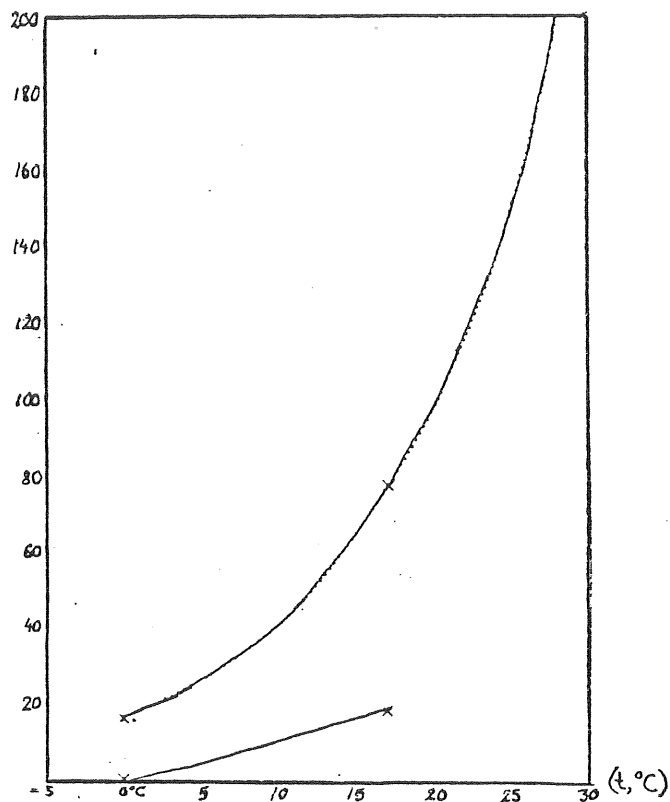
Födointaget, mätt som filtreringshastighet, hos den marina Islandsmusslan (*Artica islandica*), var störst i intervallet 15-17 °C, för att avta till strax över noll vid 0 °C och till noll vid 25 °C (figur 4) (Ali, 1970).



Figur 4. Födointaget, mätt som filtreringshastighet, hos den marina Islandsmusslan (*Artica islandica*) vid olika vattentemperaturer (Ali, 1970).

Islandsmusslan har sin utbredning i boreala och arktiska vatten. Arter från varmare regioner uppvisar andra temperaturoptima. Arktiska arter har samtidigt betydligt högre syrekonsumtion än arter från varmare vattenområden. Spärck, 1936, påpekar att syrebehovet hos akvatiska djur varierar med levnadssätt, livsfas, omgivningstemperatur och geografisk region. Aktiva djur som lever på botten kräver mer syre än mer eller mindre orörliga djur i botten. Djur i reproduktionsfas kräver mer syre än djur under normal tillväxtfas (figur 5). Om exemplar av samma art insamlas från olika klimatiska regioner, och därmed är anpassade till olika vattentemperaturer, erhålles en tydlig skillnad i syrekonsumtion vid laborieförsök (figur 6). Temperaturens påverkan av djurens utbredning beror framför allt av dess effekter på djurens metabolism (Spärck, 1936). Samme författare påpekar också att det finns olika temperaturraser, med avseende på temperatureffekter på metabolismen, inom samma område.

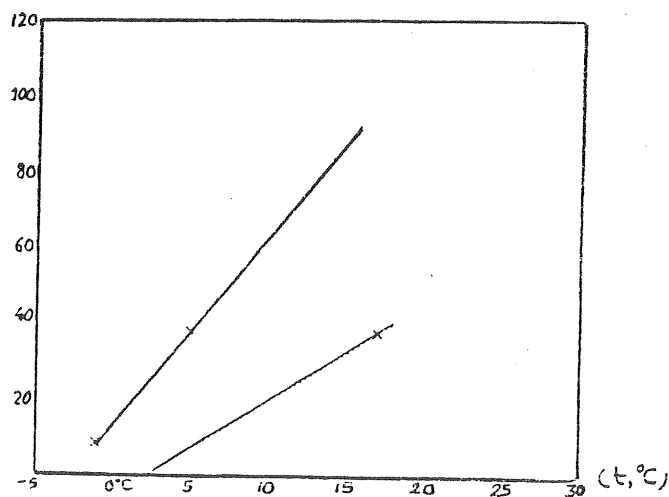
Syrekonsumtion  
cc/h.kg



Figur 5. Skillnad i syrekonsumtion mellan Östersjömusslor (*Macoma baltica*) i tillväxtfas respektive reproduktionsfas. Den övre linjen avser musslor i reproduktionsfas och den undre avser musslor i tillväxtfas.

Figur 6. Skillnad i syrekonsumtion mellan exemplar av musslan *Astarte montagui* insamlade från Grönland (övre linjen) och från Danmark (undre linjen).

Syrekonsumtion  
cc/h.kg



Bottendjur ovanför språngskiktet i sjöar och hav är bättre anpassade att motstå ändringar i omgivningens temperatur, medan arter under språngskiktet lever i en miljö som är mer stabil och är därför inte anpassade att klara av stora fluktuationer i miljön. Rosenberg och Möller (1979) har visat hur bottendjursfaunan på västkusten ovanför språngskiktet regleras av fysikaliska-kemiska miljöfaktorer, medan faunan under språngskiktet huvudsakligen regleras av biologiska interaktioner. Jonasson (1969) har indelat limniska bottendjur ovanför språngskiktet i två grupper beroende av hur djuren uppför sig när syrehalterna i vattnet minskar:

1/ Artens syreförbrukning avtager succesivt när syrehalten minskar,

ex.vis arterna *Lymnaea palustris*  
*Bithynia tentaculata* (snäckor, limniska)

2/ Arten vidmakthåller samma syreförbrukning trots att syrehalten minskar, vid ett visst kritiskt syrevärde avtager plötsligt artens syrekonsumtion,

ex.vis. arterna <i>Lymnaea auricularia</i>	Kritisk syrenivå	11% mättn.
<i>Bithynia leachi</i>	- " -	14% -"-
<i>Valvata piscinalis</i>	- " -	9% -"-

Faunan under språngskiktet, som i sötvattnen i regel är anpassad till låga syrehalter, faller huvudsakligen in i grupp 2 ovan. De djur som bäst tål låga syrehalter är tre arter som har hemoglobin i blodet; nämligen *Chironomus anthracinus*, *Tubifex barbatus* och *Ilyodrilus hammoniensis* (Jonasson, 1969). Den förstnämnda respirerar med 75% av sin normala kapacitet även när syremättnaden är 1%.

Flertalet akvatiska djur kräver att en viss temperaturtröskel ("trigger temperature") uppnås innan en ny livsfas (ex. vis migration, reproduktion osv.) kan inledas. Crisp (1957) visade att den marina musslan *Venus mercenaria* kan fås att fortplanta sig på vintern, mot normalt sommartid, om man succesivt höjer temperaturen och tillför näring. Arktiska och boreala arter tål inte höga temperaturer vid reproduktionstiden. Havstulpanen *Balanus balanoides* södra utbredningsgräns bestäms av vinterisotermen för 45°F. Söder om denna linje får arten alltför kort period med kallt vatten under vintern, vilket medför att leken uteblir. Sålunda kan olika arter kräva förberedande perioder med en viss temperatur eller att en viss temperaturnivå uppnås för att reproduktionen skall inledas. Lehmkuhl, 1974, rapporterar att bottenfaunan i Saskatchewan-floden slogs ut 120 kilometer nedströms ett värmeutsläpp, beroende på att den jämna förhöjda, men icke i sig letala, vattentemperaturen gjorde att livsfunktionerna sattes ur spel då inga nyckeltemperaturer förekom.

Bottendjur inom den tempererade zonen visar normalt högst tillväxt under sommarhalvåret. Om extra värme tillföres kontinuerligt under hela året förskjuts i regel tillväxtperioderna mot vår och höst. Detta beror av att den förhöjda vattentemperaturen oftast blir för hög under sommaren, då vattnet redan har en hög begynnelsetemperatur. Tinsman och Maurer (1974) fann högre skal-tillväxt, högre köttvikt och högre glykogenhalt hos en population amerikanska ostron (*Crassostera virginica*) under vintern i ett vatten med utsläpp av varmvatten jämfört med en kontrollpopulation från opåverkade vatten. Sommartid var förhållandet det omvända, dvs kontrollpopulationen hade de högsta värdena. Utslaget över hela säsongen visade sig dock populationen från det varmare vattnet ha högst tillväxt. Samma tendenser har rapporterats av Copeland, Laney och Pendleton (1974).

Dahlberg och Conyers (1974) fann att antalet arter och individer av bottendjur ökade när medeltemperaturen i en sjö ökade. Stangeberg och Pawlacyk (1974) fann samma tendens, men när temperaturen översteg 30 °C minskade antalet bottendjur. Att temperaturer över 30 °C verkar begränsande för bottendjuren har även visats av Benda och Profitt (1974), som i en amerikansk flod fann en lokal utslagning av bottendjuren i ett område där vattentemperaturen var förhöjd till 31-35 °C. En enda djurgrupp hade ökat inom utsläppsområdet, nämligen fjädermygglarver vilka hade nått höga tätheter i området.

Runström (1928) har redovisat övre temperaturlötoleranser för marina bottendjurs embryonalutveckling. (De redovisade djuren är arter från tempererade vatten).

Sjöborren <i>Stromylocentrotus droebachiensis</i>	11°C
Sjögurkan <i>Cucumaria frondosa</i>	13°C
Blåmussla <i>Mytilus edulis</i>	16°C
Sjöborren <i>Echinus esculentus</i>	16°C

En ytterligare komplikation kan uppstå om vattnet i förtid värms upp och därigenom reproduktionen startar innan miljön är lämpad för larverna.



### 11.2.5 Effekter på växter.

Växter definieras i föreliggande arbete som flercelliga arter som sitter förankrade i botten eller utmed vattenområdenas stränder..

Växterna och växtplanktonen svarar för att sjöar och havs syreförråd fylles på. Endast i rinnande vatten har inblandning av atmosfäriskt syre någon större betydelse.

Insjöar har av olika författare indelats utgående från florans av makroskopiska växter. Jonasson (1969) föreslår följande indelning:

Floristisk typ	Max.veg.djup	Domin.växter	Växtplanktons årsprod.
Drepanocladus.	2-4 m	Drepanocladus Fontinalis Sphagnum	60-70 gram C/m <sup>2</sup>
Lobelia.	10 m	Lobelia Isoetes Littorella	60-70 gram C/m <sup>2</sup>
Lobelia -Potamogeton.	5-10 m	Lobelia Myriophyllum	60-70 - " -
Potamogeton.	2-6 m	Potamogeton Myriophyllum	60-140 - " -
Potamogeton-Nuphar.	1-5 m	- " -	160-500 - " -
Nuphar.	1-5 m	Nymphaeidae	200-1200 - " -

Rotade växter blir hårt ansatta av miljöförändringar när de inte kan undfly stressfaktorn. Första undersökningen av temperatureffekter på växter utförde Sachs 1864. Han fann att *Ceratophyllum demersum* (Hornsärv) tålde 50-gradigt vatten i tio minuter. Setchell (1924) fastslog att temperaturen är den viktigaste faktorn för tillväxt och utveckling hos den akvatiska blomväxten *Ruppia*. Andersson (1969) visade att *Ruppia* ersätts av *Potamogeton perfoliatus* (nate) vid temperaturer över 35°C. Även växterna *Phragmites communis* (vass) och *Spartina alterniflora* tålde vattentemperaturer upp till 35°C. Plantor i områden med förhöjda vattentemperaturer var inte toleranta ekotyper selekterade ur populationen, utan varje enskild planta hade vidtagit egna fysiologiska förändringar, så kallad värmehärdning.

*Zostera marina* (Bandtång), som lever inom i stort sett samma habitat som *Ruppia*, visade sig bero mer av totala instrålningen från solen än av temperaturen för sin tillväxt (Sand-Jensen, 1975).

Tillväxten för växter i vattenområden med förhöjda temperaturer visade, liksom bottendjuren, högst tillväxt under vår och höst jämfört med en kontrollpopulation från opåverkade vatten (Copeland, Laney och Pendleton, 1974). Även här berodde detta på att de redan höga sommartemperaturerna blev för höga vid varmvattenutsläppet. Michanek (1969) rapporterar om förändringar i antalet djur- och växtarter vid ett utsläpp av kylvatten från ett kärnkraftverk i Morro Bay, Californien (tabell 2).

	temperaturförhöjning +10°C	+15°C	Normalt omr.
Växtarter (antal stycken)	4	10	33
Djurarter ( - " - )	71	27	44

Tabell 2. Antal djur- och växtarter från ett område med lokala förhöjningar av temperaturen med fem respektive tio grader Celcius. Från Morro Bay, Californien.  
Källa: Michanek, 1969.

Resultatet blev alltså mer djur och färre växter i området med varmvattenutsläpp. Orsaken till detta är oklar, men kan bero av djurens större rörlighet, som gör att sensitiva arter kan undfly området, medan bättre anpassade kan invandra.

Värmeutsläpp i ett träskområde i Florida gav stora skador på trädfloran (Sharitz, Gibbons och Gause, 1974). Till detta bör då läggas att dessa träd även påverkades av onormala vattenståndsfluktuationer och ändrade sedimenteringsförhållanden i området.

### 11.2.6 Effekter på växt- och djurplankton.

Växtplankton kan, liksom bakterier, indelas i olika klasser beroende på temperaturkrav (se avsnitt 2.3). Liksom hos andra djurgrupper kan arter av samma släkte ha vitt skilda temperaturoptima. Exempelvis arterna av släktet *Chlorella* varierar märkbart i fråga om temperaturoptima, som kan vara 25°C, 30°C eller 39°C (Sorokin, 1959). Värmeälskande, termofila, alger kan fås att växa bra även vid relativt sett låga temperaturer. Arten *Cyanidium* som har en övre toleransgräns vid 55-60°C (Doemel och Brock, 1970) växer bra vid 15°C (Becker, 1972). Köldälskande arter, däremot, verkar ha snävare toleransintervall, dvs vara mer stenotherma. Hindak och Komarek (1968) påpekar att den köldälskande arten *Koliella tatrae* har temperaturoptimum vid 4°C och maximal temperatur som tolereras är 10°C.

Djurplanktons temperaturtoleransgränser är dåligt undersökta. Bush, Welch och Mar (1974) rapporterade att utav 8500 beskrivna arter av limniska evertebrater (rygggradslösa djur), fanns bara temperaturintervall, inom vilka arten trivs, uppmätta för 94. Av dessa 94 arter är de flesta bottendjur och endast ett fåtal djurplankton. Trots att man vet att unga stadier är känsligast för temperaturfluktuationer finnes endast ett tiotal arbeten utförda med unga stadier. Goss och Bunting (1976) redovisar övre tolererad temperatur för ett flertal olika djurplankton (tabell 3).

Djurgrupp	Art	Acklimatiseringstemp.	Stadium	Letaltemp.
Märkräfta	<i>Pontoporeia affinis</i>	6°C	Adult	10.4°C
Anostraca	<i>Artemia salina</i>	?	"-	39°C
"-	"-	25°C	Ägg	103.5°C
Hinnkräfta	<i>Daphnia magna</i>	Rumstemp.	Adult	41°C
"-	<i>D. pulex</i>	"-	"-	44°C
Hoppkräftor	<i>Cyclops vernalis</i>	"-	"-	32-39°C
Pungräka	<i>Mysis relicta</i>	4.5°C	"-	16°C

Tabell 3. Övre tolererad temperatur för ett antal planktoniska kräftdjur. Sammanställning från Goss och Bunting, 1976.

Vid undersökningar spelar det stor roll, vilket tidigare påpekats, hur experimentet utföres. Sker temperaturhöjningen gradvis blir överlevnaden större än om djuren utsätts för en abrupt ändring. På samma sätt inverkar acklimatiseringstemperaturen. Föreligger det liten skillnad mellan acklimatiseringstemperaturen och testtem-

peratur blir inte situationen så ansträngd för testdjuret. En mycket viktig faktor är dessutom försökets och efterobservationens längd.

Craddock (1976) visade att ingen reproduktion förekommer hos hinnkräftan *Daphnia pulex* vid vattentemperaturer över 27°C (jämför med letaltemperaturen i tabell 3 på föregående sida).

I Ontariosjön befanns planktonmortaliteten på grund av kylvattenutsläpp från ett kärnkraftverk vara 5% vid temperaturer under 35 °C för att öka till 100% vid en vattentemperatur av 40.5°C (Storr, 1969).

Allmänt reagerar plankton på förhöjda vattentemperaturer med högre metabolism, ändrad artsammansättning och förändrad mortalitet. Bland växtplankton sker en gradvis övergång från de kallvattenälskande kiselalgerna (diatoméerna) till grön- och blågrönalger (Rankin, Buck och Foerster, 1969). I samband med temperaturändringar brukar också planktonorganismernas kroppsstorlek förändras. Rankin et al., (1969) redovisar en minskning av algernas cellstorlek vid ökad vattentemperatur, medan Martin och Gentry (1969) rapporterade att kroppsstorleken ökat hos insekter (trollsländelarver av släktet *Libellula*) i vatten med förhöjd temperatur. Detta förklarar de senare med att den förhöjda temperaturen minskat antal insektsarter, varefter de återstående individerna utsatts för lägre konkurrens och sålunda kunnat växa sig större. Samma författare påvisade att de arter som fanns i det varmare vattnet hade förändrats genetiskt mot en värmetåligare population (även Bradley, 1978).

Vid undersökningar av plankton utanför kylutsläpp från svenska kärnkraftverk har man inte kunnat påvisa en fauna av värmeälskande arter. Istället har man erhållit en kallvattenfauna med förmåga att uthärda förhöjda temperaturer. Detta beror av de oregelbundna driftstoppen som snabbt slår ut en invandrad varmvattenfauna (Öström, 1978 och pers.komm.).

Under våren och vintern är det huvudsakligen temperaturen som kontrollerar tillväxt hos plankton, medan näringstillgång är den viktigaste faktorn sommertid i tempererat klimat (Yentsch, Yentsch, Strube och Morris, 1969 samt Öström, 1978)

11.2.7 Effekter på fisk.

Fisk utgör ofta toppredatorerna inom våra akvatiska ekosystem. Påverkan av djurgrupper lägre ned i näringspyramiden får slutligen effekter även på fiskfaunan.

Zawisza och Backiel (1972) indelade olika arter av fisk med avseende på temperaturlöslighets (tabell 4).

Grupp	Art	Letaltemperatur vid acklimatisering vid 25°C
1	vanlig Karp Ruda Sutare Färna Löja	37.7 - 40.6 °C
2	Sarv Id Gös	36.5 - 38.2 °C
3	Mört Abborre Sandkrypare	35.2 - 36.7 °C
4	Gers Bitterling Storspigg	34.4 - 36.5 °C

Tabell 4. De fyra huvudgrupper som fiskar kan indelas i med avseende på temperaturrestans.  
(Ur Zawisza och Backiel, 1972)

I litteraturen finns en stor mängd arbeten om direkt temperaturinverkan på fisk, främst då letalgränser för fiskfaunan. När det gäller långtidseffekter av subletal karaktär under naturliga förhållanden finns det däremot ytterst få arbeten att tillgå.

Undersökningar har dock gjorts för att utröna vilken temperatur enskilda fiskarter föredrager. Cherry, Dicksson och Cairns (1977) har visat att vid preferensförsök beror resultatet till väldigt stor del på den inledande acklimatiseringstemperaturen. Av femton testade arter hade alla utom abborre, regnbåge, öring och bäckröding högre preferenstemperatur än acklimatiseringstemperatur i intervallet 12-27 °C. Vid temperaturer över 30 °C var preferenstemperaturen lägre än acklimatiseringstemperaturen.

Fergusson (1958) har visat att de temperaturpreferenser som uppmätts i laboratorium kan ge en relativt god uppfattning om fiskens miljökrav.

Sammanställningar om fiskars temperaturpreferens har presenterats av Coutant, 1977; Cherry, Dickson och Cairns, 1977; Ferguson, 1958.

Brett (1971) fann att Indianlax (*Oncorhynchus nerka*) vanligtvis föredrager 15°C, en temperatur där aktiv metabolism, hjärtrytm och simhastighet är störst för arten. Om det finns obegränsad mängd föda har arten optimal tillväxt vid denna temperatur, men om födotillgången är begränsad förskjuts optimala tillväxttemperaturen nedåt.

När en fisk väl anpassat sig till omgivningens temperatur kan även små ändringar av denna leda till stora förändringar hos fiskens metabolism, jonförhållanden och syra-bas förhållanden i kroppsvätskorna (Crawshaw, 1977).

Fiskens födointag är lätt att studera under laboratorieförhållanden, varför ett flertal arbeten finns om temperaturens inverkan på födointaget. Arktiska fiskar, vilka kan existera inom temperaturintervallet -2°C till +15°C, har visat sig vara effektiva vid omvandling av föda till kroppstillväxt (Wohlschlag, 1960). Vissa arter av arktiska fiskar kan leva hela sitt liv under ett konstant istäcke i vattentemperaturer under 0°C (Scholander et al., 1957). Hathaway (1927) visade att tre amerikanska fiskarter (*Lepomis incisor*, *Eupomotus gibbosus*, *Micropterus salmoides*) åt tre gånger mer föda vid 20°C jämfört med 10°C. Nikolsky (1963) visade hur födointaget ökade och digestionstiden minskade med ökad temperatur hos Kaspisk mört (*Rutilus rutilus caspicus*).

Aktiviteten hos abborre, skrubbskädda, mört, gers, ål, id och havsöring i samband med förhöjda temperaturer har undersökts av Nyman (1974). Abborre är en dagaktiv art vars aktivitet ökar med ökande temperatur i intervallet 5-30°C. Skrubbskäddan, en nattaktiv art, visar inom intervallet 10-20°C samma tendens som abborre, dvs svarar med en aktivitetsökning vid ökad temperatur. Även mört uppvisade samma tendens även om undersökningsmaterialet var något litet för säkra slutsatser. Allmänt kan sägas att en snabb ökning av temperaturen medför en stressituation för fisken, varför dess aktivitet ytterligare ökar.

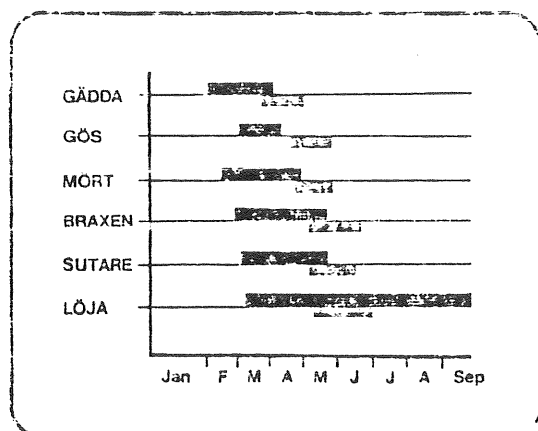
Ålen befanns vara nedgrävd vid temperaturer under 8°C, för att börja ett aktivt födosök när temperaturen stigit till 10°C. Vid 14-16°C ökade ålens aktivitet mer och den blev frisimmande. Aggressionen mellan ålar ökar markant vid 17°C och revir etableras. När vattentemperaturen 21°C är ålarna aktiva dygnet runt.

Nyman (1974) rapporterar att en fiskart (gers) inom loppet av ett år genetiskt anpassat sig till en artificiell temperaturändring. Arten är normalt kallvattenälskande men genom att attrahera individer från omgivningen, som haft en lämplig genetisk uppbyggnad, har lokalpopulationen kunnat anpassa sig snabbt. Crawshaw (1977) påpekar att det framför allt är funktionen hos det centrala nervsystemet som modifieras vid en anpassning till ändrad temperatur. Denna ändring kan dels ske inom varje enskild individ och även vara en genetisk förändring hos populationen.

I några av de stora sjöarna i USA (Michigan och Erie) anser man att de sista årtiondenas höjning av medeltemperaturen med en grad, vilken skett som en följd av industrialiseringen längs stränderna, haft en katastrofal inverkan på fisket. Sik, siklöja och kanadaröding som tidigare dominerade levde nära den övre gränsen för sina temperaturkrav och de har nu i praktiken slagits ut.

Det har visat sig att flera olika fiskarter växer bättre under somrar med ovanligt hög temperatur. Varmare försomrar har gett bättre årsklasser av sik i Vättern och Kalmarsund, exvis år 1953 (Svärdsson och Nilsson, 1964). Samma författare rapporterar att äldre abborrar endast tillväxer vid temperaturer över 10°C. Svärdsson (1957) skriver att årsklasserna av lax blir större vid varm tidig vår och mild vinter. Beronde på hur sträng vintern varit gynnas olika typer av östersjö-sill (höst- respektive vårlekande) (Sjöblom, 1978).

Vad som framför allt påverkas är de unga stadierna av fiskarnas liv. Abborre som levde nära sin södra utbredningsgräns i South Carolina (USA) dog ut i en sjö som mottog varmvatten från industrialanläggningar. Detta berodde av att den optimala lektemperaturen, 4-6°C, inte längre förekom inom området (Ruelle, Lorentzen och Oliver, 1977).



Figur 7. Lektidens förändring i samband med förhöjning av vattentemperaturen. Svart stapel visar lekens omfattning under uppvarmda förhållanden, grå stapel visar den normala lektiden. (ur: Zawisza och Backiel, 1972)

Förhöjda vattentemperaturer innebär ofta att lektiden tidigare-  
läggs och förlänges (figur 7). Resultatet blir att tillväxten ten-  
derar att öka. De negativa effekterna av en temperaturhöjning är  
ändrade predationsmönster, ändrad artsammansättning mot mindre eko-  
nomiskt värdefulla arter och en ökad parasitism på fiskarna. Blir  
höjningarna respektive sänkningarna av temperaturen alltför stora  
slås de känsliga unga stadierna ut.



### 11.3. Effekter på organismerna av isbildning i sedimenten.

Mycket få djur tål infrysning under någon längre period. Musslor kan överleva ända upp till 85% av deras kroppsvätska fryst, dvs några timmar till några veckors exponering för temperaturer under  $0^{\circ}\text{C}$ . Detta gäller dock strandnära arter vilka är anpassade att klara klara stora temperaturfluktuationer. Sker infrysning i sediment med arter, som visserligen normalt lever under låg temperatur, men som inte är adapterade att klara en infrysning blir effekterna stora. Vid frysning runt slangar med kylvätska nedlagda i sedimenten sker en lokal utslagning av faunan medan arter i periferin av isbildningen kan förflytta sig bort från denna. Frysningen får dock aldrig gå så långt att hela bottenområden tillfrysas helt, emedan effekterna härav torde bli katastrofala för hela vattensystemet.

Marina evertebrater (ryggradslösa djur) har hyperosmotiska (högre joninnehåll än omgivningen) kroppsvätskor och är därför relativt resistenta mot frysning (DeVries, 1961). Marina fiskars kroppsvätskor däremot är hypoosmotiska, dvs fryser innan havsvattnet fryser. Detta undantaget kvastfening och hajar och rockor vilka är isoosmotiska (lika stort joninnehåll) med havsvattnet. Vissa arter av arktiska fiskar lever i vatten med temperaturer ned till  $-1.7^{\circ}\text{C}$ , medan deras serum fryser vid  $-0.9^{\circ}\text{C}$ . De är alltså "superkylda" med cirka  $0.8^{\circ}\text{C}$  (Scholander, 1957). Orsaken till deras resistens är att de berikar sitt serum med fryspunktsnedsättande ämnen. Huvudsakligen är det glycoproteiner som utsöndras. Dessa fiskar kan dock inte överleva om de kommer i direkt kroppskontakt med is utan måste vintertid migrera ned till djupare vatten där ingen is finnes.

Ändringar av kroppsvätskans fryspunkt förekommer även hos fiskar från våra kustvatten. Röttsimpa har sommartid en fryspunkt på  $-0.64^{\circ}\text{C}$  i serumet för att vintertid ha  $-0.86^{\circ}\text{C}$ . För arten under lång tid aklimatisera sig till låga temperaturer kan serumets fryspunkt sänkas ytterligare (DeVries, 1961).

Sötvattenfiskar undviker frysning huvudsakligen genom migration till djupare och därmed varmare vatten. Några arter kan överleva infrysning genom att begrava sig i de varmare bottensedimenten som sällan fryser. Detta gäller exempelvis ruda och ål. Fryser

även sedimenten under en längre period överlever knappast ens dessa arter.

Massmortaliteter på grund av låga vintertemperaturer har rapporterats av ett flertal författare: Dannevig (1930), Johansen (1931), Crisp (1964), Templeman (1965) etc..

Sömme (1966) visade att strandnära marina mollusker tålde frysning ned till  $-22^{\circ}\text{C}$  i flera dagar (*Modiolus modiolus*, *Mytilus edulis*, *Littorina litorea*). Han påpekar att endast arter som lever i strandregionen tycks ha förmåga att utstå frysning. Överlevnaden blir större om djuren först acklimatiseras till låga temperaturer, dvs överlevnaden är störst vintertid. Arktiska evertebrater från strandzonen har visat sig överleva sex månaders infrysning (Kanwisher, 1959). Vad som framför allt begränsar överlevnaden är kroppens förmåga att motstå mekanisk skada av de vassa iskristallerna.

#### 11.4. Effekter av ändrad temperatur på organismernas miljö och konsekvenserna för fauna och flora.

Artificiella ändringar av vatten- och sedimenttemperatur inverkar på de biokemiska processernas hastighet och därmed bland annat på nedbrytning och omsättning av organiskt material. Även kretslopp av näringsämnen och tungmetaller påverkas. Konsekvenserna blir i regel allvarligare för de akvatiska ekosystemen vid en höjning av temperaturen jämfört med en sänkning.

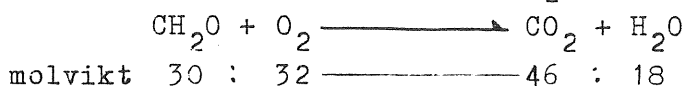
##### 11.4.1 Påverkan av vattnets syreinhåll.

Vattnets syreinhåll varierar beroende på sjötyp och föroreningsgrad. Vanligtvis är syrehalten högre i ytvattnet för att minska under språngskiktet. Detta beror av att det sker en stor nyproduktion av syre i vattnets översta lager av gröna växter och plankton. Under språngskiktet sker ytterst liten syreproduktion, medan samtidigt dött organiskt material nedbrytes här under syrekrävande processer. Allt organiskt material kan dock inte nedbrytas utan en viss del anrikas i sedimenten. För att fullständigt nedbryta detta organiska material åtgår syre (Eglington och Murphy, 1969).

I den aeroba (syreinhållande) delen av sedimenten nedbrytes mellan 65-85% av det organiska materialet. Denna nedbrytning fortsätter till viss del i den underliggande anaeroba (syrefria) delen av sedimentet, men blir aldrig fullständig. Sålunda återstår 35-10% av det organiska materialet onedbrutet.

Nedbrytning av org. material (efter Olausson, 1972):

a/ Teoretiskt org. material: CH<sub>2</sub>O

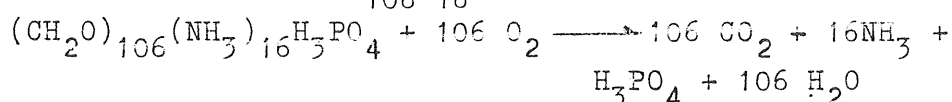


Sättes mängden org. mat. till 1 gram blir de stökiometriska förhållandena:

$$1 : 1.07 : 1.53 : 0.60$$

dvs ett gram org. material motsvarar en syreförbrukning av 1.07 gram. Omvandlat innebär detta 0.75 ml O<sub>2</sub>.

b/ Planktonisk typorganism: C<sub>106</sub>N<sub>16</sub>P



Här motsvaras 1 gram org. material av 0.69 ml O<sub>2</sub>.

c/ Fjordsediment: C<sub>89</sub>N<sub>16</sub>P

Enligt liknande formler och beräkningar skulle 1 gram org. material förbruka 0.68 ml O<sub>2</sub>.

Höjes sedimenttemperaturen ökar aktiviteten hos bakterierna, varvid de nedbrytande processerna accelereras. Härvid åtgår mer syre, varför bottenvattnets syreförråd slutligen kan sina helt. Sker detta frisläpps näringsämnen fosfor och kväve, vilka tidigare varit bundna till sedimenten. Dessa gödningsämnen ökar vattnets produktion av växtplankton, vilka redan gynnats av den förhöjda temperaturen. Den ökade produktionen svarar sedan för ett ökat organiskt nedfall. Resultatet blir en ond cirkel med ökad produktion, ökat organiskt nedfall, ökad nedbrytning, minskat syre-innehåll i bottenvattnet, ökat utsläpp av gödningsämnen osv..

Huruvida frigörelsen av fosfor (i formen  $PO_4^{2-}$ ) och kväve (i formen  $NH_4^+$ ) från sedimenten är temperaturberoende eller ej är flitigt debatterat. Hallberg et al. (1973) menar att det normala kväveinnehållet i sedimentet är så högt (ca 10% av torrvikten) att ytterligare tillskott av organiskt material inte ökar avgången av kväve från sedimenten. Han påpekar vidare att sedimenttemperaturer mellan 2-20°C inte påverkar kväveåtergången. Engvall (1978) rapporterar att kväveåtergången till vattnet ej är temperaturberoende i intervallet 2-17°C. Han visar vidare att återgången är lika stor från oxiderade som från reducerade (syrefria) sediment.

Serruya et al. (1974) anser att återgången av kväve till vattnet fördubblas när temperaturen ökar med 10°C. Jakobsen och Jørgensen (1975) påpekar att omsättningen av kväve torde bero av den temperaturberoende nedbrytningen av organiskt material samt den totala kvävehalten, det vill säga vara en funktion av temperatur, syreförhållanden och sedimentets kväveinnehåll.

Holm (1978) visade att frigörelsen av fosfor ökar med ökande temperatur.

Bottenvattnets medeltemperatur i Östersjön har ökat med 1°C under 1900-talet. Det innebär att nedbrytningen av org. material och därmed syrekonsumtionen ökat 10% (Yhlen, 1977). Vid försök med sediment inneslutet i boxar fann Hallberg et al. (1973) att ett temperaturtillskott på fem grader motsvarade en 30%-ig ökning av syrekonsumtionen, samtidigt som fosforutsläppen ökade. En ytterligare konsekvens var att sedimenten blev syrefria och därmed gynnades de bakterier som kan nedbryta och utvinna syre och energi ur sulfat ( $SO_4^{2-}$ ). Slutprodukten blir gasen svavelväte ( $H_2S$ ). Svavelväte är mycket giftigt, för däggdjur är gasen till och med giftigare än cyanväte (blåsyra).

Man skiljer mellan akut och kronisk toxicitet. Det föregående innebär att en enda hög dos verkar snabbt på organismen, medan det senare innebär att låga doser som länge finns i miljön på lång sikt kan ge skador.

Olika stadier i ett djurs utveckling (t.ex. ägg-larv-vuxen) är olika känsliga för  $H_2S$ . I regel är de yngre stadierna betydligt sensitivare än adulta individer. Beroende på vilken art man testar varierar svavelvätets toxicitet, men allmänt är svavelväte akut toxiciskt mellan 0.0100 - 0.0400 mg/liter vatten ( $LD_{50}$ -dos). Dessa värden gäller dock bara en försökstid av 96 timmar och är därför relativt ointressanta emedan den kroniska toxiciteten verkar hämmande vid betydligt lägre koncentrationer. Redan vid halter kring 0.0010 - 0.0020 mg  $H_2S$ /lit förhindras äggläggning hos fiskar av det amerikanska släktet *Lepomis* (Smith och Oseid, 1976). Vår svenska gäddas äggläggning slås ut vid en koncentration av 0.0060 mg/lit (op.cit.).

Mollusker tål perioder med svavelväte bättre på grund av att de kan stänga sina skal och anaerobt, under kortare tid, nedbryta upplagrade produkter. Till deras motståndskraft bidrar också förmågan att sänka sin aktivitet och att kunna suga in "friskare" vatten med sina sifoner (Theede, 1973)

Svavelvätets giftighet beror av att det binder metalljoner från olika enzymer och därmed inaktiverar dessa. Bland annat kan järnet i enzymet Cytokrom oxidase bindas, varvid hela andningskedjan i cellerna inaktiveras. Samtidigt verkar svavelväte sänkande på cellernas redoxpotential och försvårar därmed cellernas oxidationsprocesser. Normalt förekommer svavelväte i letala doser för de flesta botten djur redan på 15 cm djup i våra kustfjordars sediment.

Theede (1973) påpekar att djur har lägre tolerans mot svavelväte vid förhöjda temperaturer. Denna additiva effekt mellan värme och ett gift kommer att diskuteras utförligare i nästa avsnitt.

En förändrad temperatur medför också ändringar i sedimentens, och i vissa fall det ovanliggande vattnets, pH och redoxpotential ( $E_h$ ). De ovan redovisade nedbrytningsprocesserna av organiskt material (a-c) ger en del något sura biprodukter, vilka dock snabbt buffras av koldioxid-kolsyra-systemet till pH kring 7. I försurade sjöar, 20% av landets sjöar är kraftigt försurade och ytterligare 30%

löper risk att allvarligt försuras, är detta buffertsystem ur funktion, varför en temperaturhöjning kan medföra en ytterligare försurning.

Redoxpotentialen, som är en funktion mellan oxiderande och reducerande ämnen, kan beskrivas med uttrycket:

$$Eh = \text{Konstant} + \log(\text{oxiderande ämnen}) - \log(\text{reduc. ämnen})$$

Då syre är det viktigaste oxiderande ämnet kan uttrycket omskrivas:

$$Eh = \text{antal mol } O_2 - \text{antal mol } CH_2O \text{ (org. materiel)}$$

1. Om mol  $O_2 >$  mol  $CH_2O$ ; dvs  $Eh > 0$ , så oxideras sedimenten.
2. Om mol  $O_2 <$  mol  $CH_2O$ ; dvs  $Eh < 0$ , så reduceras sedimenten.

(Olausson, 1970)

Vid en temperaturförhöjning infaller fall två, dvs  $Eh < 0$ . (se figurer 8, 9 och 10).

Volkov (1975) påpekar att  $Eh$ , som kan variera från +600 millivolt till -350 millivolt, är beroende av inslaget organiskt material, och sålunda också av temperaturen. Han rapporterar vidare att reducerade marina sediment föreligger om den totala kolhalten överskrider 2%.

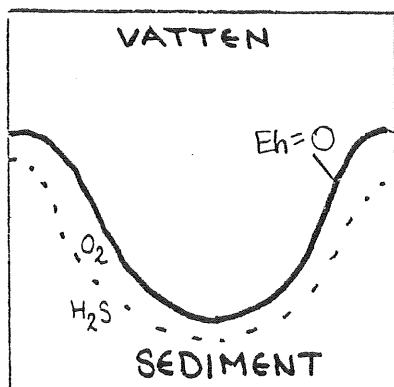


Fig. 8.

Opåverkat friskt bottenområde.

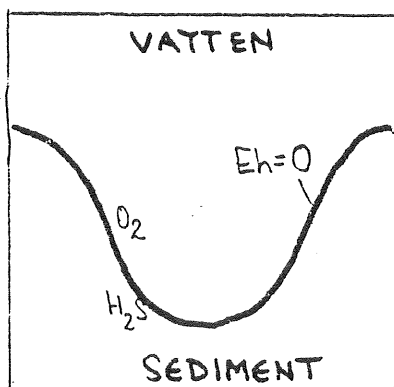


Fig. 9.

Temperaturförhöjning i sedimentet minskar syret och flyttar  $Eh=0$ -nivån upp mot bottenytan.

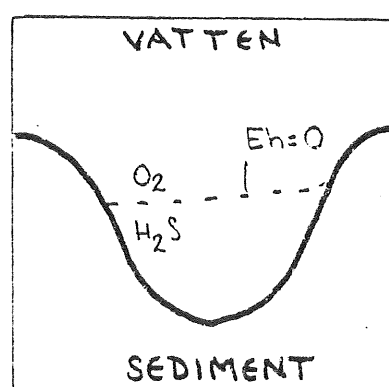


Fig. 10.

Samma förhållanden som i figur 9, men med stagnant bottenvatten. (Alla figurer modifierade efter Olausson, 1970).

Vid en sänkning av sedimenttemperaturen blir förhållandet det motsatta, dvs en tempsänkning kan hindra övergödningen av en ansträngd sjö.

Syrets löslighet i vatten beror av salthalt och temperatur. Ju högre temperatur desto mindre syre kan lösa sig och följaktligen finns vid höga temperaturen mindre syre tillgängligt för organismerna. Syremättat vatten håller 13.2 ppm syre vid 4°C, men bara 7.7 ppm vid 30°C. Denna ändring av syrekoncentrationen kan tolereras av de flesta akvatiska organismer men kombinerat med ytterligare stressfaktorer kan den visa sig skadlig.

#### 11.4.2 Effekter av temperaturen på olika ämnens toxicitet.

I litteraturen finnes ytterst få arbeten redovisade där man studerat effekterna av temperaturändringar på toxicitet hos olika ämnen i fungerande ekosystem. Man har istället inriktat sig på laborieförsök. En sammanställning av hittills genomförda arbeten har publicerats av Cairns, Heath och Parker (1975). Om inget annat anges är nedstående material hämtat från detta arbete.

Det kan vara svårt att särskilja effekter av temperatur och gifter, då både temperaturen i sig och giftet kan vara letala eller åtminstone stressa organismen. Denna samverkan mellan temperatur och gifter kallas synergism.

En ökad temperatur verkar även negativt ihop med gifter på ett annat sätt, eftersom en ökad temperatur medför en ökad metabolism och därmed en ökad kontakt och anrikning av olika gifter.

Temperaturen kan även bidra till att föra in gifter i ekosystemet genom att gifter som legat inaktiva i sedimenten på grund av syrebrist kan frisläppas. Många spårelement är bundna till de järn- och manganföreningar som vid syrerikt vatten även binder kväve och fosfor. Vid syrebrist reduceras dock järn och mangan varvid komplexbindningarna med närsalterna och spårelementen bryts. Härvid kommer exempelvis koppar, kobolt, arsenik och nickel ut i vattnet igen.

Det är frestande att påstå att en ökad temperatur innebär att toxiciteten hos olika gifter ökar, men samtidigt ökar också aktiviteten hos cellernas avgiftningsmekanismer och utsöndringen av intagna ämnen ökar. Här för blir temperatureffekterna på toxiciteten mycket komplexa och varierar mycket mellan olika djurarter.

Ammonium( $\text{NH}_4^+$ ) är relativt ogiftigt för akvatiska djur. Fiskars

tolerans av  $\text{NH}_4^+$  påverkas i regel inte nämnvärt av temperaturen, men vissa arter har lägre resistans vid högre temperaturer (ex. vis öring). Wuhrman och Worker (1953) rapporterade att akut toxiska nivåer av  $\text{NH}_4^+$  tolererades kortare tid vid högre temperaturer. Här föreligger alltså ingen nämnvärd effekt av temperaturen på subletala doser, men en temperatureffekt på toleransen av letala doser. Detta är ett förhållande som går igen för ett flertal gifter.

Ammonium verkar huvudsakligen på fiskars gälar, njurar och inälvor. Genom att sätta cellmembranen ur funktion åstadkommer  $\text{NH}_4^+$  en inströmning av vatten i cellerna.

Cyanid ( $\text{CN}^-$ ) hydrolyseras mer vid lågt pH och blir härigenom giftigare. Alltså får cyanidutsläpp större negativ effekt i försurade vatten.

Toleranstiden innan försöksdjuret dog var kortare vid högre temperaturer. Den akuta toxiska dosens storlek påverkades dock inte. Cyanid påverkar organismerna på samma sätt som svavelväte (se ovan).

Zink (Zn). Temperaturens inverkan på zinks giftighet varierar från art till art. Lloyd och Herbert (1962) rapporterade att regnbåge inom intervallet 13.5 - 21.5 °C inte uppvisade ändrad tolerans gentemot zink. Samma resultat för låga zinkkoncentrationer har redovisats för sniglar av Cairns och Scherer (1958). van der Schalie och Berry (1973) fann liklydande resultat för dammsnäckor. De förra fann dock att vissa fiskar uppvisade sämre resistens vid höjd temperatur. Rakt motsatt effekt rapporterar Sprague (1970), som fann att toleransen av subletala zinkhalter ökade med ökad temperatur för lax.

Överlevnaden i akut toxiska doser minskade dock för alla arter vid ökad vattentemperatur.

Zink verkar främst på gälar, genom att fjärma gälepitelet från blodbanorna och på så sätt minska andningseffektiviteten. Efter som ökad temperatur ökar flödet av vatten över gälarna kommer organismerna i kontakt med mer gift per tidsenhet vid högre temperaturer, vilket ytterligare bidrager till zinks giftighet.

Koppar (Cu), Nickel (Ni), Kadmium (Cd) Krom (Cr). Rehwoldt et al. (1972) menar att toleransnivåerna för subletala doser av koppar, nickel, kadmium och krom inte påverkas av temperaturen. Eisler (1971) fann att kadmiums giftighet på den marina fisken Fundulus ökade med



temperaturen i intervallet 5-20°C. Kadmium orsakar vävnadsskador på flertalet av kroppens organ. Marina fiskar dricker stora mängder havsvatten, varför kadmium via tarmarna kan nå havsfiskars inre organ. Detta visar att temperatur-påverkan på limniska arter inte nödvändigtvis går att applicera på marina fiskar.

Kvicksilver (Hg). Kännedomen att kvicksilver anrikas i akvatiska organismer har överskuggat det faktum att Hg är starkt giftig för de akvatiska djuren. Jämfört med andra metallsalter som vanligtvis påträffas i förorenade vatten är kvicksilverklorid giftigast, möjligtvis undantaget silvernitrat.

Amend et al (1969) visade att temperaturens inverkan på subletala dosers giftighet för regnbåge var liten. Syrehalten visade sig ha större betydelse. Vid låg syrehalt tvingades djuren till en hög pumphastighet varför mer Hg passerade gälarna (jämför avsnittet om zink). Kvicksilver verkar toxiskt direkt på gälarna och djuret blir alltså mer påverkat vid en högre pumphastighet.

I motsats till detta visade Thatcher (1974) att regnbåges tolerans mot Hg var störst vid 15°C, för att avta mot lägre respektive högre temperaturer. Författaren förklarar detta med att 15°C ligger nära regnbågens optimala livstemperatur, vilket gjorde att djuret var i bästa kondition för att möta miljöstress.

Klorerade kolväten. Bland de klorerade kolvätena har man huvudsakligen undersökt DDT och Endrin i det akvatiska ekosystemet. Högre temperaturer ökar toleransen mot DDT, medan toleransen mot Endrin minskar med ökande temperatur.

DDT uppvisar flera intressanta interaktioner med temperaturen. Bland annat har det visats att unga laxar som utsätts för subletala halter av DDT väljer en lägre temperatur i en värmegradient. Ökas däremot DDT-halten, fortfarande till subletala doser, så väljer laxarna allt högre uppehållstemperatur.

DDT absorberas av gälar och i tarmen. Skador orsakas främst på det centrala nervsystemet.

Fenoler. Fenoler är en av de få ämnesgrupper som är mer toxiska när temperaturen är låg.

Fenoler angriper främst centrala nervsystemet och hjärtverksamheten.

### 11.5. Toxicitet hos kylvätskan.

Etylenglykol används ofta ihop med olika alkoholer för att förhindra frost och isbildning på flygplan. Detta medför att en hel del arbeten utförts för att utvärdera de ekologiska effekterna av etylenglykoler.

Oral ingestion av både mono- och dietylglykol verkar toxiskt på njurar och det centrala nervsystemet (Watson och Jones, 1977 samt Evans och David, 1977). Letala doser för husdjur är höga, LD<sub>50</sub>-dosen (den dos då 50% av försöksdjuren dör) är cirka 10 ml/kg kroppsvikt. En dos av 0.05 mg/kg kroppsvikt har inga långtidseffekter på däggdjur (motsvarar cirka 1 mg/liter av intaget vatten).

Nedbrytningen av etylenglykoler beror av vattnets status och temperatur. Vid 20°C tar nedbrytningen tre dagar, vid 8°C tar nedbrytningen cirka sju dagar. Nedbrytningen är bakteriell.

Härav kan slutas att etylenglykol inte utgör något stort hot mot den akvatiska faunan. Lokala utslagningar helt intill ett utsläpp kan få letal verkan, men snart spädes etylenglykolen till subletala doser, vilka snart brytes ned.

### 11.6. Effekter på fiskets utövande.

Effekter på enskilda arter redovisas i kapitlen 2,3 och 4. Här skall endast kortfattat beröras de effekter en sedimentvärmeanläggning kan ha på fiskets utövande.

Då sedimentvärmeanläggningar än så länge tänkts lokaliseras till sötvatten innebär en anläggning inte något större hinder för yrkesfisket. De nedgrävda kylslangarna kan, om de ligger ytligt, rivas upp av trålningar o. dyl., men då detta knappast förekommer inom sötvatten föreligger ingen risk för sådana skador.

Endast under anläggningsarbetena torde ett avbräck i sötvattenfisket vara att förvänta. Allvarligare är de undflyende reaktioner som fisken kan uppvisa om vattnet störs av en sänkt temperatur. Dessa undflyende-reaktioner är svåra att förutsäga då temperaturändringarna troligen blir ringa. Fiskar kan dock känna temperaturdifferenser ned till 0.03°C skillnad, varför undflyende-effekterna inte får negligeras.

### 11.7. Effekter av anläggningsarbeten.

Forskare har under det senaste decenniet ägnat allt större uppmärksamhet åt akvatiska växt- och djursamhällens förmåga att återvända och etablera sig i områden där de tidigare slagits ut. Rosenberg (1974) visar att bottendjuren i Saltkällefjorden i Bohuslän återhämtat sig 5-8 år efter att en pappermassa-fabrik upphört med utsläpp i fjorden.

Allmänt kan sägas att djursamhällen ovanför språngskiktet återhämtar sig snabbare (4-5 år) än djursamhällen under språngskiktet (5-10 år). Detta beror av, som tidigare påpekats, att djuren ovanför språngskiktet är bättre anpassade till fysikaliska stressfaktorer. De är anpassade till att ex.vis. efter en kall vinter, då många av dem dött, snabbt återkolonisera de strandnära områdena.

Återkolonisationen går snabbare och säkrare i marin miljö. Här finnes en stor vattenvolym med en reserv av nya individer som snabbt kan vandra in i ett tidigare stört område. I sötvatten med dess mindre "organismreserv" kan en miljöstörning ibland leda till att irreversibla förhållanden uppkommer.

De anläggningsarbeten som måste utföras i samband med en sedimentvärmeanläggning torde endast ge kortvariga effekter på flora och fauna i medelstora och stora vattensystem.

### 11.8. Kortfattad summering av olika värmesystems effekter på det akvatiska ekosystemet.

Allmänt kan sägas att redan små temperaturförändringar inom de delar av vatten-sedimentsystemet där organismer lever kommer att ge förändringar i flora och fauna på lång sikt. Huruvida dessa förändringar endast blir små eller om hela organismsamhällen förändras och eventuellt utarmas beror på temperaturändringens storlek och sjötypen. I en redan stressad miljö, där till exempel buffertkapaciteten mot pH-förändringar är liten, kan den extra stressfaktorn höjd temperatur vara utslagsgivande och sålunda begränsa och förändra flora och fauna.

Vid en aktiv nedpumpning av värme till sedimenten kommer en ond cirkel som slutligen kan leda till helt syrefria sediment att igångsättas. Samtidigt ökar utsläppen och giftigheten av olika ämnen, varför den kombinerade effekten blir mycket allvarlig för organismerna. Skall värme lagras i sediment måste detta ske på sådant djup att värme inte tränger upp till bottendjurens livszon, dvs värmen bör ej tillåtas sprida sig uppåt till mer än  $1\frac{1}{2}$  meter under bottenytan.

Om sedimenten skall frysas för att ytterligare utvinna värme måste även denna frysning vara mycket begränsad. Frysning får små effekter om det sker djupt nere i sedimenten, men bör icke tillåtas i sedimentytan. Under inga omständigheter kan man tillåta att hela botten fryser emedan detta medför att bottendjuret och vissa fiskar (ruda och ål) då inte har någon tillflyktsort undan kölden.

Nedan följer en kortfattad summering av de särskilda effekter, förutom ovan nämnda, som är att förvänta på organismerna av olika sedimentvärmesystem. För en detaljerad beskrivning av systemen hänvisas till kapitel 4.

#### a/ Kylslangar utlagda ovanpå botten:

- ° Liten påverkan av ekosystemet under anläggningsarbeten.
- ° Stort hinder för fiske och förankring av båtar.
- ° Direktkontakt med kylslangarna gör att organismer undflyr området.
- ° Mikroturbulenser i vattnet ovanför slangarna uppkommer.
- ° Påväxt på slangarna.

b/ Nedgrävt, horisontellt slangsystem:

- ° Stor negativ påverkan på bottenorganismerna vid anläggningsarbeten. Det kan ta flera år innan flora och fauna återhämtat sig.
- ° Inget hinder för fiske och båtintressen.
- ° Begravs slangarna tillräckligt djupt bör påverkan på organismerna ej bli stora.

c/ Vertikalt neddrivna brunnar:

- ° Lokalt stor negativ påverkan på bottenorganismerna vid anläggningsarbeten. Påverkan härav torde dock bli mindre än i fall b och d.
- ° Hinder för fiske och båtintressen. Hindren torde dock inte vara lika stora som i fall a ovan.
- ° Pumpas värme aktivt ned för lagring via ett slutet system blir effekterna på flora och fauna inte stora.
- ° Används ett öppet system för lagring av värme innebär detta att planktoniska organismer kommer att sugas ned till sedimenten. Plankton utsätts härmed för en stressituation samtidigt som en del av dem kan slås sönder. De sönderslagna organismerna kommer att göda botten, varvid produktionen och därmed syreförbrukningen kommer att öka. Detta kan slutligen leda till att en s.k. ond cirkel uppstår.
- ° Vid användandet av öppna system föreligger också risk för igenväxning av insug och slangar av mollusker och alger.

d/ Nedsugning av bottenvatten genom sedimenten till perforerade slangar:

- ° Liksom i fall b sker en stor påverkan av bottensamhället, som härfter torde vara reducerat i omfattning under ett antal år.
- ° Inget hinder för fiske och båtintressen.
- ° Sugs bottenvatten ned i sedimenten kommer syrehalten i dessa att öka, vilket möjliggör en fullständig nedbrytning av det organiska materialet. Härvid kommer mer energi i omlopp och produktionen kan öka. En ond cirkel med ökad gödning och ökad syrebrist kan alltså bli följden. Detta motverkas dock i viss mån av nedsugningen av nytt vatten till sedimenten, varför slutresultatet är svårt att förutsäga.
- ° Nedsugningen av syrsatt vatten kan också öka organismernas djupurbredning i botten. Om syrenivån genom nedsuget hålles konstant kan ett stabilt syrekrävande organismsamhälle utvecklas.
- ° Nedsugningen av vatten kan medföra att kanaler bildas i sedimenten. I dessa kanaler kan en syrekrävande fauna etablera sig.

11.9 Referenser.

- Ali, R.M., 1970, "The influence of suspension density and temperature on the filtration rate of Hiatella artica", *Marine Biology* 6:291.
- Amend, D., Yasutake, W., Morgan, R., 1969, "Some factors influencing susceptibility of rainbow trout to the acute toxicity of an ethyl mercury phosphate formulation (TIMSAN)", *Trans. Amer. Fish. Soc.* 98:419-425.
- Andersson, R.R., 1969, "Temperature and rooted aquatic plants", *Chesapeake Sci.* 10(3-4):157-164.
- Ankar, S., 1969, "Den vertikala fördelningen hos makrofaunan i sediment från två mjukbottentyper jämte några miljökomponenter", Stencil.
- Anon., 1978, "Marin ekologi, sedimentologi och marina miljöföröroningar" Fysisk Riksplanering 5, Bostadsdepartementet.
- Becker, W., 1972, "Physiologische Untersuchungen zur Photosynthese von Chlorella", *Z. Pfl. Physiol.* 58:212-221.
- Benda, R.S., Profitt, M.A., 1974, "Effect of thermal effluents on fish and invertebrates", ur "Thermal ecology" av Gibbons (ed.), pp 438-447.
- Bradley, B.P., 1978, "Genetic and physiological adaptation of the copepod Eurytemora affinis to seasonal temperatures", *Genetics* 90(1):193-205.
- Cairns, J., Scheier, A., 1958, "The effects of temperature and hardness of water upon the toxicity of zinc to the pond snail, Physa heterotropha (SAY)", *Notulae Naturae Acad. Nat. Sci.* 308:1-11.
- Cairns, J., Heath, A.G., Parker, B.C., 1975, "The effects of temperature upon toxicity of chemicals to aquatic organisms". *Hydrobiologia* 47(1):135-171.
- Cherry, D.S., Dickson, K.L., Cairns, J., Stauffer, J.R., 1977, "Preferred, avoided and lethal temperatures of fish during rising temperature conditions", *J. Fish. Res. Board Can.* 34(2):239-246.
- Christensen, J.M., Larsen, S., Nystöm, B.O., 1979, Svensk översättning och bearbetning P. Möller., "Musslor i havet" Wahlström och Widstrand.
- Copeland, B.J., Laney, R.W., Pendleton, E.C., 1974, "Heat influences in estuarine ecosystems". Ur "Thermal ecology" av Gibbons (ed.), pp 423-437.
- Coutant, C.C., 1977, "Compilation of temperature preference data". *J. Fish. Res. Board Can.* 34(5):739-746.
- Craddock, D.R., 1976, "Effects of increased water temperature on Daphnia pulex". *Fish. Bull.* 74(2):403-408.
- Crawshaw, L.I., 1977, "Physiological and behavioural reactions of fishes to temperature change". *J. Fish. Res. Board Can.* 34(5):730-734.
- Crisp, D.J., 1957, "Effect of low temperature on the breeding of marine animals" *Nature* 179(4570):1138-1139.
- Crisp, D.J. (ed.), "The effects of the severe winter of 1962-63 on marine life in Britain". *J. Anim. Ecol.* 33(1):165-210.
- Dahlberg, M.D., Conyers, J.C., 1974, "Winter fauna in a thermal discharge with observations on a macrobenthos sampler". Ur "Thermal ecology" av Gibbons (ed.), pp 414-422.
- Dannevig, A., 1930, "The death of fish in very cold waters". *J. Cons. Explor. Mer.* 5(2):194-196.

- DeVries, A.L., 1961, "Freezing resistance in fishes". *Ur Fish physiology* vol 6, Hoar, W.S., Randall, D.J., pp 157-190.
- Eglinton, G., Murphy, M.T.J. (ed.), 1969, "Organic geochemistry", Springer Verlag.
- Eisler, R., 1971, "Cadmium poisoning in Fundulus heteroclitus (Pisces: Cyprinodontidae) and other organisms". *J.Fish.Res.Board.Can.* 28: 1225-1234.
- Engvall, A-G., 1978, "The fate of nitrogen in early diagenesis of Baltic sediments". *Contr. in Microbial Geochemistry, Dep. of Geol., Univ. of Stockholm*. No 2.
- Evans, W.H., David, E.J., 1974, "Biodegradation of mono-, di- and triethylene glycols in river waters under controlled laboratory conditions" *Water Res.* 8:97-100.
- Fergusson, R.G., 1958, "The preferred temperature of fish and their mid-summer distribution in temperate lakes and streams". *J.Fish.Res. Board Can.* 15(4):607-624.
- Gibbons, N.E., 1934, "A biological study of "ice-fillets"". *Contr.Can.Biol. Fish.* 8(24) ser.C ind (17), pp 301-310.
- Gubitz, H., 1928, "Kältebakterien, mit besonderer Berücksichtigung ihrer Bedeutung für die Milchwirtschaft". *Milchw.Forsch.* 5:407-456.
- Goss, L.B., Bunting, D.L., 1976, "Thermal tolerance of zooplankton". *Water Res.* 10:387-398.
- Hallberg, R.O., Bågander, Engvall, Lindström, Odén, Scippel, 1973, "The chemical microbiological dynamics of the sediment water interface". *Contrib. from the Askö lab., Univ. of Stockholm*, vol2:1.
- Hathaway, E.S., 1927, "The relation of temperature to the quantity of food consumed by fishes". *Ecology* 8:428-434.
- Hayes, F.R., Anthony, E.H., 1959, "The standing crop of bacteria in lake sediments and its place in the classification of lakes". *Limnol.Oceanogr.* 4:299-315.
- Hess, E., 1934a, "The effects of freezing on marine bacteria. 1 Quantitative studies". *J.Biol.Board.Can.* 1(2):95-108.
- Hess, E., 1934b, "Effects of low temperature on the growth of marine bacteria". *Contr.Can.Biol.* 8(34):489-505.
- Hilliard, C.M., Torrisian, C., Stone, R.P., 1915, *Science* 42:770.
- Hochachka, P.W., Somero, G.N., 1968, "The adaptation of enzymes to temperature" *Comp.Biochem.Physiol.* 27:659-668.
- Holm, N.G., 1978, "Phosphorus exchange through the sediment-water interface" Mechanism studies of dynamic processes in the Baltic sea. *Contr. in Microbial Geochemistry, Dep. of Geology, Univ. of Stockholm*, no 3.
- Håkansson, L., Källström, A., 1978, "An equation of state for biologically active lake sediments and its implications for interpretations of sediment data". *Sedimentology* 25:205-226.
- Jakobsen, O.S., Jörgensen, S.E., 1975, "A submodel for nitrogen release from sediments". *Ecological modelling* vol 1:147-151.
- Johansen, A.C., 1929, "Mortality among porpoises, fish and the larger crustaceans in the waters around Denmark in severe winters". *Dan.Biol.Sta. Rep.* 35:63-97.
- Jonasson, P.M., 1969, "Bottom fauna and eutrophication". *Ur "Eutrophication- Proceedings of a symposium, Nat.Acad.Sci., Washington*, pp 274-305.
- Kanwisher, J.W., 1959, "Histology and metabolism of frozen intertidal animals". *Biol.Bull.* 116(2):258-264.
- Lehmkuhl, D., 1974, "Thermal regime alteration and vital environmental physiological signals in aquatic organisms". *Ur "Thermal ecology" av Gibbons (ed.)*, pp216-222.

- Lloyd, R., Herbert, D.W.M., 1962, "The effect of the environment on the toxicity of poisons to fish". J. Inst. Public engineers, pp. 132-145.
- Lochhead, A.G., 1924, "Microbiological studies of frozen soils". Trans. Roy. Soc. Can. III Ser. 18, 75.
- Lochhead, A.G., 1926,  
"The bacterial types occurring in frozen soil". Soil Science 21:225-231.
- Lövstrup, S., 1976, "Livets värmebuffert och lösningsmedel". Ur "Kretslopp" av Söderberg, E., Wentzel, A.-K. (ed.) NFR's årsbok 1976/77, pp 135-137, Liber.
- Martin, W.J., Gentry, J.B., 1974, "Effects of thermal stress on dragonfly nymphs". Ur "Thermal ecology" av Gibbons (ed.), pp 133-145.
- Michanek, G., 1969, "Varmvatten för miljarderna i sjön?". Sveriges natur 4:193-198.
- Nikolsky, G.V., 1963, "The ecology of fishes". Academic press.
- Nyman, L., "Polsk fiskeriforskning och varmvattenproblematiken". Inf. fr. Sötvtn lab. 13.
- Olausson, E., 1970, "Watersediment exchange and recycling of pollutants through biogeochemical processes". Medd. fr. Maringeologiska lab., Göteborg, nr 3.
- Olausson, E., Bäckman, E., Gustavsson, O., Karlsson, L.-G., Sundström, B., Svensson, R., 1972, "Sedimentundersökningar på västkusten: förändringar och konstanter". Med. från maringeol. lab. Göteborg nr 4.
- Rankin, Buck, Foerster, 1969, "Thermal effects on the microbiology and the chemistry on the connecticut river-a summary". Ur "Biological aspects of thermal pollution" av Krenkel och Parker (eds.), pp 350-355.
- Rehwooldt, R., Menapace, L.W., Nerrie, B., Alessandrello, 1972, "The effect of increased temperature upon the acute toxicity of some heavy metal ions". Bull. Env. Cont. Tox. 8:91-96.
- Rosenberg, R., 1974, "Gullmarsfjorden-Saltkällefjorden-en studie i självrening". Sveriges Natur Årsbok , pp 181-184.
- Ruelle, R., Lorentzen, W., Olivier, J., 1977, "Population dynamics of young-of-the-year fish in a reservoir receiving heated effluent". Ur "Proceedings of the conference: Assessing the effects of powerplant-induced mortality on fish populations" av van Winkle (ed.), pp 46-47.
- Runnström, S., 1928, "Über die Thermopathie der Fortpflanzung und Entwicklung mariner Tiere in Beziehung zu ihrer geographischen Verbreitung". Bergens Mus. Arb. (Naturv. Rekke) 2:1-67.
- Sachs, J., 1864, Flora N.R. 22:139-215.
- Sand-Jensen, K., 1975, "Biomass, net production and growth dynamics in an eelgrass-population in Vellerup vig, Denmark". Ophelia 14:185-201.
- Van der Schalie, H., Berry, E.G., 1973, "Effects of temperature on growth and reproduction of aquatic snails". Publ. Office of Research and Monitoring, U.S. E.P.A., Washington D.C. 24060.
- Scholander, P.F.L., van Dam, L., Kanwisher, J., Hammel, T., Gordon, M.S., 1957, "Supercooling and osmoregulation in arctic fish". J. Cell. Comp. Physiol. 49:5-24.
- Setchell, W.A., 1924, "Ruppia and its environmental factors". Proc. Nat. Acad. Sci. 10:286-288.



- Sharitz, R.R., Gibbons, J.W., Gause, S.C., 1974, "Impact of production-reactor effluent on vegetation in a southeastern swamp forest". Ur "Thermal ecology" av Gibbons (ed.), pp 356-362.
- Sjöblom, V., 1978, "The effect of climatic variations on fishing and fish populations". *Fennia* 150:33-37.
- Smith, L.L., Oseid, D.M., Kimball, G.L., El-kanelgy, S.M., 1976, "Toxicity of hydrogen sulphide to various life history stages of bluegill (Lepomis macrochirus)". *Trans Amer. Fish. Soc.* 105(3):442-449.
- Sprague, R., 1970, "Measurement of pollutant toxicity to fish". *Water Research* 4:3-32.
- Spärck, R., 1936, "On the relation between metabolism and temperature in some marine lamellibranches, and it's zoogeographical significance". *Det Kgl. Dan. V. Selskab., Biol. Medd.* XIII, 5:1-27.
- Stainer, R.Y., Doudoroff, M., Adelberg, E.A., 1970, "General microbiology" Third edition, Macmillan and co ltd.
- Stangeberg, M., Pawlacyk, M., 1961, "The influence of warm water influx from a power station upon the formation of biocoenotic communities in a river". *Zesz. Nauk. Politech. Wr., Wroclaw* no 40(1):67-106.
- Storr, J.F., Schlenker, G., 1969, "Response of Pearch and their forage to thermal discharges in Lake Ontario". Ur "Biological aspects of thermal pollution av Krenkel och Parker (eds.), pp 363-370.
- Svärdsson, G., 1957, "Goda laxår och dåliga".
- Svärdsson, G., Nilsson, R., 1964, "Fiskeribiologi".
- Sömme, L., 1966, "Seasonal changes in the freezing-tolerance of some intertidal animals". *Nytt. Mag. Zool.* 13:52-55.
- Templeman, W.T., 1965, "Mass mortalities of marine fishes in the New Foundland area presumably due to low temperatures". *Int. Comm. Northwest Atl. Fish. Spec. Publ.* 6:137-148.
- Thatcher, T.O., 1974, "Combined effects of mercury and temperature on the mortality of rainbow trout". Ur "Thermal ecology" av Gibbons (ed), pp 54-58.
- Theede, H., 1973, "Comparative studies on the influence of oxygen deficiency and hydrogen sulphide on marine invertebrates". *Neth. J. Sea Res.* 7:244-252.
- Tinsman, J.C., Maurer, D.L., 1974, "Effects of a thermal effluent on the american oyster". Ur "Thermal ecology" av Gibbons (ed.), pp 223-236.
- Watson, G.K., Jones, N., 1977, "The biodegradation of polyethylene glycols by sewage bacteria". *Water Res.* 11:95-100.
- Wohlschlag, D.E., 1960, "Metabolism of an antartic fish and the phenomenon of cold adaptation". *Ecology* 41(2):287-292.
- Volkov, I.I., 1975, "Some aspects of chemistry of diagenesis of contemporary marine sediments". *Dep. Analytical chem. Göteborg.*
- Wuhrman, R., Worker, T., 1953, "Beiträge zur toxicologie der Fische". *Schweiz Z. Hydrol.* 15(2):235-260.
- Yentsch, C.S., Yentsch, C.M., Strube, L.R., Morris, I., 1969, "Influence of temperature on the photosynthetic efficiency in natural populations of marine zooplankton". Ur "Thermal ecology" av Gibbons (ed.), pp 508-517.
- Yhlen, B., 1977, "Kartläggning av svavelvätebottnar i egentliga Östersjöns djupområden under juni 1977". *Med. Havs fiskelab.* 233:1-33.
- Zawisza, J., Backiel, T., 1972, "Some results of fishery biological investigations of heated lakes", *Verh. Int. Ver. Limnol.* 18:1190-1197.
- Öström, B., 1978, "Primary production in heated water" *Med. Havs fiskelab.* 235.

12. RÄTTSLIGA PROBLEM KNUTNA TILL SEDIMENTVÄRME-  
UTVINNING

Staffan Westerlund

Juridiska institutionen, Uppsala universitet

Box 512, 751 20 UPPSALA

- 12.0 Förord
- 12.1 Inledning
- 12.2 Ianspråktagande av mark med mera
- 12.3 Rätten till utvinning av energi
- 12.4 Sedimentvärmeutvinning och miljörätten
- 12.5 Andra rättsliga frågor
- 12.6 Slutkommentar
- 12.7 Sammanfattning
- 12.8 Noter

## 12.0 Förord

Detta ska betraktas som en förstudie av rättsfrågor som hör samman med sedimentvärmeutvinning. De tekniska systemlösningar som kan vara aktuella för värmeuttaget framgår av kap. 4. I vissa hänseenden är resonemangen preliminära. Särskilt intressant var att behandla frågor om rätt att utnyttja flödande energikällor. De frågorna har betydelse också för andra utvinningsformer.

## 12.1 Inledning

Flera av de utvinningsformer för energi, som numera övervägs, är oförutsedda av lagstiftarna. De typer av regler som finns för närvarande kan försöksvis delas in t. ex. på följande sätt.

Energiplanering. Sådan lagstiftning är inriktad på energifrågor som sådana. I Sverige finns en lag om kommunal energiplanering (1977:439) som i det stora hela kommer att visa sig verkningslös. I 136 a § byggnadslagen anges att regeringen kan pröva tillkomsten, ofta också utvidgningen, av verksamheter som är betydelsefulla från energipolitiska synpunkter.

Energiresurser. Här har vi flera typer. De kan delas in efter resurstypen. Vi finner bl. a. följande.

Vattenkraft. Utvinning av energi från strömmande vatten är sedan länge ..... lagreglerad och då genom vattenlagstiftningen. Vattenlagen är ett komplex av regler som kan beskrivas som ett rättssystem i rättssystemet med egen processrätt, egna regler om rättförhållandena för markägare och andra, egna regler om vissa allemansrättsliga förhållanden etc. Underlättande av effektiv användning av vattenresurser är ett av huvudsyftena med vattenlagstiftningen av idag (och av igår) och detta har inverkat på lagstiftningens utformning.

Torv. Särskild koncessionslagstiftning finns numera för utvinning av torv ..... (till detta kommer att torvtäkt är tillståndspliktigt enligt naturvårdslagen). Industriverket är tillståndsmyndighet enligt den särskilda lagstiftningen.

Kol. Särskild lagstiftning finns för kolfyndigheter. Användningen av kol som bränsle faller under miljöskyddslagstiftningen. Någon särskild energi-

lagstiftning för detta finns inte, bortsett från att 136 a § byggnadslagen kräver särskilt tillstånd för särskilt tillstånd för större koleldade kraftverk o. d.

Olja. Förhållandet är likartat kolets.

Ved. Skogsvårdslagen kräver att skogsmark ska användas på ett sådant sätt, att marken varaktigt ger hög virkesavkastning. Virket kan användas som ved. Skogsvårdslagen ger inga direktiv om hur virket ska användas. S. k. energiskogar har ännu inte fått någon speciell lagstiftning. Såväl skogsmark som jordbruksmark kan beröras av sådan användning.

Rätt till s. k. vedbrand, alltså att för husbehov ta ved i skog, har länge funnits för vissa intressenter. Någon allemansrätt att ta ved, bortsett från mindre torra kvistar etc. för omedelbar användning, finns dock inte.

Uran. Särskild koncessionslagstiftning finns för uranfyndigheter. Brytning av uran kan också prövas (dock inte obligatoriskt) enligt 136 a § byggnadslagen. Användning av uran som bränsle i reaktorer faller under atomenergilagen, som är en koncessionslagstiftning och skyddslagstiftning (strålning faller inte under miljöskyddslagen utan under atomenergilagen och - delvis - strålskyddslagen) samlad i ett. Särskilda lagstiftningar finns för närvarande om vissa krav för att få ladda reaktorer och om uppskjutning av laddning.

Överföring och transport av energi. Särskild lagstiftning finns om elektriska ledningar, andra ledningar m. m. Detta går jag inte in på här. Dessa lagstiftningar är av expropriationsrättslig karaktär främst. D. v. s. att de skapar möjligheter att även mot andra markägares vilja dra fram ledningar.

Lagstiftning finns däremot inte för vindkraft, jordvärme o. d. eller för solenergi; således inte heller för utvinning av sedimentvärme. Vad gäller det sistnämnda kan vissa paralleller finnas med utnyttjande av vattenkraft. Gemensamma problem kan tyckas vara att flera fastighetsägare har del i en svårindelbar eller odelbar enhet för energiutvinning, t. ex. ett vattenfall respektive en sjö med lagrad energi. Men parallellerna är inte fullständiga, och vi måste vidare komma ihåg att utvinning av sedimentvärme och liknande hittills inte existerat i någon lagstiftares problemuppfattning.

Vid de förhållandena bör en undersökning av rättslig art om sedimentvärme läggas upp på följande sätt. Den görs i två delar. Den första är att undersöka vilka regler i gällande rätt (oavsett vilken lagstiftning som aktualiseras) som för närvarande har betydelse för genomförande av sedimentvärmeutvinning. Den andra delen innebär en granskning av möjligheterna att ändra eller tillföra regler till lagstiftningen i syfte att förenkla sedimentvärmeprojekt med iakttagande av också andra intressen såsom närboendes möjligheter att förfoga över sin mark, miljöskydd, kommunal markplanering etc.

Den nu föreliggande, förberedande rapporten, behandlar bara del 1; alltså nu gällande rätts betydelse för sedimentvärmeutvinning. Utgångspunkten blir de olika slags skydd som intressenter har genom olika lagregler. Typiska intressentgrupper är följande:

- markägare
- vattenrättshavare
- fiskerättshavare
- rörligt friluftsliv
- andra som använder viss mark
- samhällets miljöskydd och naturvård.

Listan är inte fullständig, men anger gruppen av intressen som har varierande skydd genom ett antal olika regler - regler som vanligen har till uppgift just att ge skydd för vissa användningar och förhållanden men konstruerats innan sedimentvärmeutvinning aktualiserats.

## 12.2 Ianspråktagande av mark med mera

Det finns inte någon speciellt allemansrättslig befogenhet (termen används här i mycket vid mening) att på annans mark placera anläggning eller ledning etc. Vattenområde räknas här in i mark. Om en värmeväxlare läggs ut föreligger juridiskt ett ianspråktagande av marken. I princip krävs medgivande från markägare för detta. Med nuvarande rättsregler har således anläggning för värmeutvinning inte någon särställning i förhållande till andra anläggningar där mark krävs vad gäller frågor om att ta mark i anspråk.

Om markägare motsätter sig att en anläggning placeras på hans område, måste ett expropriationsrättsligt förfarande ske för att anläggningen ändå ska kunna anläggas. Men för ett sådant tvångsvis förfogande krävs särskilt lagstöd. Expropriationsrättsliga regler finns i expropriationslagen, men också i vattenlagen, ledningsrättslagen, anläggningslagen med flera.

Expropriationslagen ger möjlighet till expropriation för energiproducerande anläggning<sup>1</sup>. Man har då haft i tankarna kärnkraftverk, oljeeldade kraftverk med flera typer. Ledningsrättslagen<sup>2</sup> blir inte alls tillämplig på själva värmeväxlaren. Även om en sådan i och för sig är konstruerad som ett system med ledningar, så är det inte denna betydelse av ledning som är av betydelse vid tillämpningen av ledningsrättslagen. Den författningen handlar i stället om ledningar som transportmedel, medan värmeväxlaren består av komponenter för utvinning av energi och inte bara transport av sådan. Däremot kan ledningsrättslagen bli tillämplig för transporterna av uppvärmt vatten från själva värmeväxlaren och därtill hörande system till förbrukningsplatserna. Det återkommer jag till.

En typisk egenhet för värmeväxlarna jämfört med produktionsanläggningar som eldas med bränsle är att den förstnämnda typen utvinnet energi på platsen. En bra parallell till detta är utvinning av vattenkraft. Reglerna för att tvångsvis förfoga över mark för sådan verksamhet finns i vattenlagen och förutsättningarna för tvångsvisa förfoganden är där något annorlunda än i expropriationslagen. Ett tillstånd att använda viss mark för värmeväxlare innebär samtidigt ett tillstånd att utvinna energi från området.

Det är mycket sannolikt att regeringen (som är den som beslutar om huruvida expropriation ska få ske) kommer att uppmärksamma denna skillnad

och anse, att det inte finns laglig grund för expropriation av mark för att där lägga en värmeväxlare. Eftersom inte heller ledningsrättslagen kan användas, heller inte annan expropriationsrättslig författning, krävs alltså medgivande från markägaren för att där placera en värmeväxlare.

### Transportledningarna

Enligt 2 § 1 st 4 p faller under ledningsrättslagen ledningar genom vilka fjärrvärme, olja, gas eller annan råvara eller produkt transporteras från produktionsställe, upplag eller lastplats förutsatt att ledningarna tillgodoser ett allmänt behov eller medför bara ett litet intrång i förhållande till nyttan. Lagen ålägger markägare att tåla att ledning dras fram, om dragningen inte orsakar "synnerligt men" för fastigheten. Gör den det kan ledningen ändå få dras fram, men då krävs att ledningen är av väsentlig betydelse från allmän synpunkt (eller att enligt koncessionsmyndighet bestämts att ledningen ska dras där). Men ledningsrätt får inte upplåtas om ändamålet lämpligen kan tillgodoses på annat sätt, inte heller om olägenheterna av dragningen överväger fördelarna (6 §). Se också 11 § om skydd för allmänna intressen. Således kan avslag ges därför att det finns alternativa utformningar eller sträckningar som är lämpligare totalt sett. Planläggning kan inverka på frågan om en lednings dragning (8 §, även 9; jfr. bl. a. 21 §).

Frågan om ledningsrätt handläggs vid förrättning och har många drag gemensamt med fastighetsbildningsärenden.

Detta innebär att lagstiftning redan finns för ledningar från värmeväxlaren (utvinningsområdet) till förbrukarna. Till ledningen räknas också nödvändiga pumphus etc. (3 §). I synnerhet om det skulle röra sig om en större sedimentvärmeanläggning för försörjning av ett bebyggelseområde, torde förutsättningarna för ledningsrätt ofta finnas. För mycket små anläggningar måste man nog visa, att det är bara ett mindre intrång som ledningen gör (mindre än "synnerligt men"), egentligen torde detta innebära att också rätt stora intrång får orsakas.

### Frågan om byggande i vatten

Byggande i vatten också på egen mark kräver tillstånd från vattendomstol om åtgärden kan påverka annans rätt eller allmän rätt. Huruvida anlägg-

ningens placering i ett vattenområde och ledningsdragningen därifrån kommer att räknas som byggande i vatten är jag för närvarande inte helt säker på, men jag lutar åt att så blir fallet. De närmare förutsättningarna för detta får utredas senare. Man måste då ta som utgångspunkt hur anläggningen blir beskaffad och hur den placeras ut samt vilka återverkningar för annans rätt det får i det enskilda fallet.



### 12.3 Rätten till utvinning av energin

Låt mig först säga att detta avsnitt blir vad som på modernt språk kallas tentativt. Det är preliminära ställningstaganden som följer. Jag har redan nämnt att flera energiutvinningsformer inte lagreglerats direkt. Det finns heller ingen rättstradition i landet vad gäller utnyttjande av energi som sådan, även om kanske domstolarna - om de tvingades avgöra ett mål där rätten till energi aktualiserades - skulle försöka sig på analogier med tidigare principer om exklusiv rätt eller företräde för markägare att utnyttja den energi som lagrats på hans mark eller som på annat sätt kan utnyttjas där. Lagrad energi finns ju i all växtlighet, där ved är den mest intressanta i detta sammanhang.

Den så kallade allemansrätten inbegriper användning av nedfallna kvistar och torra grenar etc. för eldning, men den befogenheten för annan än markägare torde tolkas restriktivt och vika för markägarens ekonomiska intresse att i sin markanvändning förfoga över också sådant material<sup>3</sup>. I övrigt torde lagrad energi i växtmaterial i princip helt tillkomma markägaren.

Energi som lagrats fossilt samt uran etc. är reglerad särskilt genom så kallad koncessionslagstiftning. De lagstiftningarna liknar gruvlagen med flera och kännetecknas av att också annan än markägaren kan få utvinna material för energiändamål på marken. Här har utvinningen bedömts som så typiskt samhällsnyttig, att markägandets befogenheter begränsats.

För förfogande över mark och där lagrad energi på sätt som nämnts krävs speciallagstiftning, för att domstolarna ska acceptera att annan än markägaren (åtminstone mot dennes bestridande) tillgodogör sig energi i form av värme lagrad i jord, sediment och vatten. Vattenlagen kan jämföras med koncessionslagstiftning i detta sammanhang och ger möjlighet åt annan än markägaren att utvinna energi. Den är alltså också en speciallagstiftning.

Sedimentvärmeutvinning och jordvärmeutvinning kan rättsligt jämföras vad gäller just frågorna om vem som har rätten till energin. Vi skall skilja mellan tre olika intressentkonflikter.

- 1) Intrånget på markytan (sjöbotten) av själva anläggningen. Den konflikten behandlades i förra avsnittet.

- 2) Konkurrensen om energin som finns i mark utanför själva anläggningens område. En anläggning kan utvinna energi som lagrats också i annan mark (vatten) än den som tillhör markägaren för anläggningens område.
- 3) Återverkningar av att energi tas ut från mark till nackdel för annan. Detta är en miljöstörning och inte en konkurrenskonflikt. Miljöstörningar behandlas i följande avsnitt och där tas upp såväl förhållandet mellan grannar som inverknings på naturmiljön från allmänna synpunkter.

Det är konkurrensen om energin, beskriven i 2) ovan, som nu ska behandlas. Jag vill nu inte ge några definitiva ståndpunkter, utan i stället diskutera frågan. Frågan är ju inte lagreglerad och heller inte rättsvetenskapligt diskuterad i Sverige.

Den som äger ett område nära en värmeutvinningsanläggning kan anse sig ha tre olika intressen:

- 1) Han vill själv utvinna energin på sitt område och en större anläggning på grannfastigheten minskar eller tar bort dessa möjligheter.
- 2) Han anser principiellt att ingen har rätt att använda energi på hans område. Han "äger" den. (Denna inställning är den primitivaste av de tre).
- 3) Han vill inte att hans mark ska försämrats som följd av temperatursänkning. Detta är miljöskyddsaspekten (som behandlas i följande avsnitt).

Den rena äganderättsaspekten (nr 2 ovan) bortser vi nu från tills vidare och ser i stället på nr 1), nämligen att grannen själv vill ha möjlighet att utnyttja den energi som lagrats på hans område.

Kommer vi i framtiden att diskutera en "energirätt" liksom vi nu har en "vattenrätt"? Alltså en rätt att utnyttja den energi som finns på ens egen mark, liksom vattenrätt nu innebär en rätt att använda det vatten som finns på ens egen grund. Paralleller finns onekligen. Båda resurserna är ekonomiskt intressanta samt användbara för drift av fastigheter likaväl som för försäljning och annan intensiv ekonomisk verksamhet. Det finns också vissa skillnader, men jag törs inte säga hur bestämda de är. Skillnaden är att uttag eller annan användning av vatten återverkar på andra fastigheter. Kanske energi som är lagrad kan tas ut utan lika direkta återverkningar? Det är dock tveksamt, eftersom grundvattentransport vid jordvärme och vattentransport

över huvud taget vid sedimentvärmeutvinning förekommer och alltså flyttar energin (uppvärmt eller avkyllt vatten) från en plats till en annan.

Låt oss tills vidare anta, att parallellerna är tillräckligt tydliga mellan å ena sidan markägarens utnyttjande av på marken befintligt vatten, å andra sidan hans utnyttjande av på marken befintlig energi. Då borde det synsätt, som vattenlagen har på vattenrätten (rätten till vatten), kunna föras över på rätten till energi. Denna min fundering gäller inte egentligen gällande rätt, utan är snarare en tanke om ett lämpligt synsätt som kunde lagfästas i samband med en framtida, sannolikt nödvändig, energilagstiftning. För att fortsätta analogin med vattenrätt kunde också grundprincipen om att vatten (eller energi) inte får användas (utvinnas) på ett sätt som hindrar andra att utnyttja sin vattenrätt (energirätt).

Resonemanget blir desto mer tilltalande som det lätt blir tillämpligt också på utnyttjandet av de direkt flödande energikällorna vind och solstrålning. (direkt sådan). Parallellen mellan vattenkraft och vindkraft är uppenbar, och utnyttjandet av den direkta solstrålningen är väl jämförbart.

Kan ovanstående ge något bidrag till en analys av gällande rätt? Om vi kombinerar förhållandet att speciallagstiftning saknas med förhållandet att energi som finns på en fastighet normalt faller under "ägandet" och med förhållandet att analogin med vattenrätten har många skäl för sig, så finns det anledning tro att om en domstol skulle avgöra ett mål, där A stämmer B och begär att domstolen ska fastställa att B inte får utvinna energi på sin fastighet på ett sådant sätt att A:s planer på något liknande därför inte kan genomföras som följd av att B kommer att utvinna också den energi som finns på A:s fastighet, så kommer domstolen att bifalla A:s talan.

---

Not: Från miljöskyddssynpunkt och planeringssynpunkt är vattenlagens princip om vattenrätt i vissa hänseenden besvärlig, eftersom utnyttjandet av den rätten så ofta ger besvärliga miljöeffekter samt hindrar alternativa samhällsutvecklingar i vissa områden. När det gäller energiutvinning behöver kanske inte lika stora problem uppstå, förutsatt att miljöskyddslagstiftningen tillämpas fullt ut på återverkningarna av energiutvinningen och förutsatt vidare att planlagstiftning innehåller möjligheter att avstyra olämpliga utvinningsföretag.

Däremot är det för tidigt att bedöma hur målet skulle avlöpa om omständigheterna i stället var sådana, att A inte planerade utvinna energi från sin mark och heller inte åberopade miljöeffekter av utvinningen utan bara på principiella skäl (se 2) ansåg att B inte hade rätt använda energi som fanns på A:s mark.

Även om min prognos om utfallet i domstol är riktig, kvarstår ändå behovet av en lagstiftning. Dels kan en sådan (förutsatt en funktionell utformning) säkrare påverka rättstillämpningen, dels är det mycket sannolikt att vid en närmare analys av olika problem och samhällsbehov det visar sig, att preciserade regler behövs utöver de principiella som nyss skisserats. Principen kan behöva modifieras, som också skett i vattenlagstiftning och på andra håll.

#### 12.4 Sedimentvärmeutvinning och miljörätten

Jag går nu över till de intressekonflikter som kretsar kring olika återverkningar av energiutvinningen av ekologisk betydelse samt av betydelse för vissa andra synpunkter som traditionellt förs samman med naturvårdsaspekter (rörligt friluftsliv etc). En miljörättslig granskning av energiutvinningsformer är i princip enkel att göra även om utvinningsformen är ny och i sig oreglerad i lag.

Detta beror på att miljörätten i mycket hög utsträckning utgår från effekter av olika åtgärder snarare än från olika åtgärdstyper. Om t. ex. helt nya verksamhetstyper dyker upp i samhället, typer som lagstiftarna tidigare inte känt till, så finns ändå ofta en eller flera lagstiftningar som direkt är tillämpliga. Tillämpligheten på nya företeelser varierar något mellan olika lagstiftningar, men beskrivningen kan ändå anses som rättvisande. Jag ska ge ett par exempel och presenterar samtidigt med detta de centrala lagstiftningarna på miljöområdet.

Naturvårdslagen kan tillämpas för att föreskriva begränsningar och skyddsåtgärder för all slags verksamhet som kan inverka på naturmiljön<sup>4</sup>. För bestämda områden kan lagen användas för att freda från påverkan.<sup>5</sup>

Miljöskyddslagen gäller för all slags markanvändning som på vissa angivna sätt kan påverka omgivningen.<sup>6</sup> Om en tidigare helt oförutsedd form av markanvändning inleds, så finns ändå miljöskyddslagen redan där och "väntar" nämligen förutsatt att den nya formen kan ge någon av de effekter, som så att säga utlöser miljöskyddslagens olika regler.

Innan jag går in närmare på det här området måste understrykas att man måste skilja mellan å ena sidan att en lag gäller, med sina krav på skyddsåtgärder, förbud etc. för en verksamhet eller företeelse, å andra sidan att en del av de verksamheter, för vilka en lag gäller, kanske ändå inte kräver särskild tillståndsprövning innan den sätts igång.<sup>7</sup> Normalt är det så att en lags regler om skyddsåtgärder gäller också för sådana verksamheter, som faller under lagen men som inte obligatoriskt måste förprövas. En term som kan användas för regler, om vilka begränsningar och försiktighetsmått som krävs av en verksamhet, är termen "tillåtlighetsregler". Det vill säga regler som säger vilka krav som måste vara uppfyllda för att en verksamhet ska anses tillåtlig enligt lagen ifråga. De andra reglerna,

om tillståndsprövning etc, kan kallas förprövningsregler och är närmast en slags procedurregler. Vid en förprövning (t. ex. byggnadslov, vattendomsstolsprövning etc) bedömer byggnadsnämnden, vattendomstolen etc. vad lagens tillåtlighetsregler innebär överförda på den verksamhet som provas.

Jag ska nu gå över till just sedimentvärmeutvinning och ange, vilka krav eller "tillåtlighetsregler" som aktualiseras för sådan verksamhet.

Sedimentvärmeutvinning kan antas medföra åtminstone någon påverkan på naturmiljön. Därmed uppfyller den kriterierna för arbetsföretag som påverkar naturmiljön i naturvårdslagens mening. Naturmiljön omfattar både vatten- och landmiljö, inklusive kulturpåverkat landskap. Om förutsättningar för olika organismer ändras är det i naturvårdslagens mening naturmiljö som ändras.

Naturvårdslagen formulerar mycket klart den principen, att aktsamhet måste visas i umgänget med naturen samt att det vid arbetsföretag som kan påverka naturmiljön regelmässigt ska ingå begränsning eller andra skyddsåtgärder för att minska eller förebygga miljöskada.<sup>8</sup> Ingen har rätt till ersättning för att han/hon som följd av dessa regler måste minska eller ändra sina planer eller sin verksamhet.

Det är bara vissa verksamheter som är tillståndspliktiga enligt naturvårdslagen, och sedimentvärmeutvinning hör inte dit. Men 20 § naturvårdslagen säger att var och en, som tänker utöva en verksamhet som allvarligt kan påverka naturmiljön, ska samråda med länsstyrelsen dessförinnan. Detta samråd är ett viktigt instrument för att genomföra naturvårdslagens regler.<sup>9</sup> I normalfallen ankommer det på exploatören/företagaren själv att bedöma, om samråd behövs. Men länsstyrelsen har möjlighet att ta initiativet. Så även om företagaren tycker att naturmiljöeffekterna är så obetydliga, att samråd inte behövs, så kan länsstyrelsen alltid tvinga sig på företagaren (förutsatt att länsstyrelsen känner till planerna) och samråda.

Samrådsinstrumentet har som en integrerad del möjligheten för länsstyrelsen att ge råd och anvisningar, när så behövs också direkta förelägganden, som skyddsåtgärder av olika slag. Dessa krav får inte medföra att pågående markanvändning avsevärt försvåras.<sup>10</sup> Startande av ett sedimentvärmeutvinning är dock en ändring av markanvändning.

Det anses också, att krav enligt 20 § naturvårdslagen inte får innebära att ett företag helt hindras.<sup>11</sup> Jag är tveksam om hur välgrundat det påståendet är. Bland annat torde verksamhet på en viss plats kunna hindras helt, ifall det finns andra platser som är lämpligare (jämför 4 § miljöskyddslagen, nämnd nedan). Vidare är det inte självklart hur man definierar "arbetsföretag" i 20 §. Jag går inte in på detta närmare<sup>12</sup> utan inskränker mig till att konstatera att det är en utbredd uppfattning, som följs i praktiken (åtminstone för det mesta), att 20 § inte kan användas för att totalt stoppa en verksamhet ("arbetsföretag") samt att definitionen på arbetsföretag inte är självklar.

Länsstyrelsen har möjlighet att bestämma att för visst område ska gälla en skyldighet för var och en, som tänker utföra en viss åtgärd ("arbetsföretag") att anmäla detta till länsstyrelsen för samråd.<sup>13</sup> Regeringen kan för hela landet införa motsvarande anmälningsplikt.<sup>14</sup> Givetvis är sedimentvärme- och jordvärmeutvinning inte (ännu) anmälningspliktiga på detta sätt.

Även om naturvårdslagen ger stora möjligheter för länsstyrelsen att kontrollera sedimentvärmeutvinning från miljösynpunkt, skulle tillämpningen av miljöskyddslagen kunna något vidga möjligheterna i vissa hänseenden. Den lagstiftningen skulle också ge ägare till grannfastigheter, som kan påverkas av utvinningen, större och delvis andra möjligheter än annars att få styrning på utvinningsverksamheten.

Huruvida miljöskyddslagen verkligen gäller för sedimentvärmeutvinning kräver en analys. Problemet är nämligen huruvida temperatursänkning i mark eller vatten är en sådan störning från användning av fast egendom som miljöskyddslagen gäller för.

Låt mig inleda med konstaterandet att miljöskyddslagens tillämpningsområde är beskrivet på ett öppet sätt.<sup>15</sup> Lagen gäller för utsläpp av avloppsvatten samt markanvändning som på något sätt kan orsaka vattenförorening. Det är ytvatten som skyddas. Frågan är om termisk förändring faller under förorening.

Utsläpp av uppvärmt, annars rent vatten (kylvattenutsläpp) faller under miljöskyddslagen såsom avloppsutsläpp. Lagstiftaren avsåg där uttryckli-

gen den termiska förändringen som skäl för detta.<sup>16</sup> Då rör det sig om temperaturhöjning. Temperatursänkning har väl ingen funderat över i samband med lagstiftningens tillkomst. Jag tror dock att de myndigheter som på högre nivå tillämpar miljöskyddslagen (främst koncessionsnämnden för miljöskydd) kommer att se termisk förändring, och inte bara temperaturhöjning, som likställt med förorening samt föra över detta på all markanvändning som kan påverka ytvattentemperaturer. (Medveten lagring av värme i vattenområde kommer därmed att falla under miljöskyddslagen).

Vi kan därför anta att koncessionsnämnden skulle se miljöskyddslagens syfte (bl. a. vattenvård) och öppna lagstiftningsteknik samt tillämpning på kylvattenutsläpp som skäl för att tolka lagens tillämpningsområde till alla temperaturändrande aktiviteter. Vi kan också notera att miljöskyddslagen förutom vattenvård också gäller för andra omgivningsstörningar, såsom luftförorening, ljus, buller, skakningar "och annat sådan".<sup>17</sup> Jordvärmeprojekt faller därmed under miljöskyddslagen.

Vilka är då de viktiga konsekvenserna av att miljöskyddslagen tillämpas. De är flera. För det första tolkas den lagens lokaliseringsparagraf<sup>18</sup> på det sättet att om det finns bättre platser för en verksamhet (bättre från miljösynpunkt) än den föreslagna, så får inte den föreslagna platsen användas (såvida inte alternativet skulle vara oskäligt dyrare), och då tas inte hänsyn till huruvida just den som vill utöva verksamheten själv har möjlighet att välja annan plats (detta kallas i juridiken för en "objektiv bedömning", dvs. att man bortser från de subjektiva omständigheterna hos den aktuella företagaren). Överfört på en sedimentvärmeutvinning så innebär detta att om sådan utvinning med fördel från miljösynpunkt kan förläggas till annan plats, oavsett om den som vill driva projektet kan genomföra alternativet, så får inte projektet på den först tänkta platsen genomföras. Därmed skulle det behövas en bedömning om lämpliga platser inom ett större område, utförd av företagaren, och sedan val av den bästa av dessa i samråd med länsstyrelsen, för att man säkert ska följa miljöskyddslagen.

Till denna lokaliseringsregel kommer regeln att vid all verksamhet, som miljöskyddslagen gäller för, ska begränsning av verksamheten eller andra försiktighetsmått vidtas inom ramen för vad som är tekniskt och ekonomiskt möjligt och rimligt. Om trots detta olägenheterna av verksamheten blir stora ("olägenhet av väsentlig betydelse") får verksamheten ändå inte utövas. (Vis-



sa undantag från det sistnämnda finns, som jag inte går in på här).

De som kan driva igenom att nämnda regler verkligen blir tillämpade är länsstyrelsen, naturvårdsverket och som prövningsmyndigheter koncessionsnämnden för miljöskydd (besluten överklagas till regeringen) eller fastighetsdomstol (på stämning från grannar; om koncessionsnämnden får frågan för behandling ska dock fastighetsdomstolens prövning skjutas upp samt därefter bli bunden av koncessionsnämndens beslut; detta gäller dock inte skadeståndstalan).<sup>19</sup> Grannar kan alltså få frågan bedömd av fastighetsdomstol. I kategorin grannar för jag här in också andra som har intressen som påverkas av en miljöfarlig verksamhet, t. ex. en organisation som hyr fiskevatten.

Det hittills sagda om miljöskyddslagen har utgått från temperaturförändringarna. Emellertid gäller miljöskyddslagen för föroreningar över huvudetaget, och redan risken för sådan ska beaktas. Om det finns någon som helst risk för att vätskan i värmeväxlarna kan läcka ut, så gäller miljöskyddslagen för anläggningen också av den anledningen. En viktig princip i den lagen är nämligen just detta med "omkastad bevisbörda", att redan risken för en förorening eller störning ska räcka för att lagen blir tillämplig.<sup>20</sup>

Risken med vätskorna gör att också lagen om hälso- och miljöfarliga varor blir aktuell. Den kräver försiktighetsmått av liknande slag som miljöskyddslagen (skillnaderna är inte av sådan betydelse att jag på detta stadium ska gå in på dem) och tillämpas av produktkontrollnämnden.<sup>21</sup> Den löpande, lokala tillsynen ankommer på hälsovårdsnämnden medan länsstyrelsen utövar tillsyn på regional nivå. Vissa tillsynsfunktioner vilar på arbetarskyddssidan, men det saknar betydelse i detta sammanhang.

Med stöd av denna lag kan krävas annan vätska, säkrare ledningar etc. för att hindra läckage etc., men förbud mot att ha anläggningen på en viss plats torde inte kunna ges med stöd av denna lag. Där är alltså miljöskyddslagen starkare.

Hälsovårdsnämnderna ska också, och främst, tillämpa hälsovårdsstadgarna. Denna gäller vid sidan av annan lagstiftning och är inriktad på dels förhindrande av sanitär olägenhet, dels att skäliga åtgärder ska vidtas för att förebygga bl. a. vattenförorening.<sup>22</sup> I senare hänseendet är stadgan en parallell till miljöskyddslagen. För sedimentvärmeutvinningens del torde (förutom

aspekterna på temperaturändring som vattenvårdsproblem) det vara vätskorna i anläggningen som kan aktualisera hälsovårdsstadgans tillämpning. De materiella reglerna i denna är sådana, att miljöskyddslagen och lagen om hälso- och miljöfarliga varor tillsammans räcker minst lika långt. Men genom hälsovårdsstadgan ges hälsovårdsnämnderna formella befogenheter som kan ha betydelse.

#### 12.5 Andra rättsliga frågor

En större anläggning för sedimentvärmeutvinning torde kräva begränsningar i alternativa användningar av vattenområdet, särskilt för sjöfart. Ankringsförbud kan behövas. Sådant kan utfärdas av länsstyrelsen med stöd av sjötrafikförordningen. Förutsättningarna för ett sådant förbud är, såvitt jag förstår, endast att länsstyrelsen bedömer det som lämpligt. Sannolikt (det får studeras närmare senare) bör vattendomstol ta ställning till om alternativ användning av vattenområdet får förhindras eller försvåras i mål om byggande av anläggningen i vatten. Om vattendomstol accepterat anläggningen, torde länsstyrelsen ha att utfärda nödvändiga förbud mot ankring.

Beträffande kollision med fiskeintressenter etc. kan vi sannolikt tills vidare likställa anläggningen med andra anläggningar som påverkar vattenmiljön. Några rent fysiska hinder för att använda fiskeredskap torde inte anläggningen orsaka. Inverkan på miljöförhållandena har berörts i föregående avsnitt. Anläggningsarbetenas inverkan på fisket bedöms av vattendomstol om tillstånd söks. Om fiskeintressenter med rätt till området berörs, föreligger tillståndsplikt, som nämnts tidigare.

## 12.6 Slutkommentar

Som redan inledningsvis påpekades är detta en preliminär bedömning av rättsfrågor som hör samman med sedimentvärmeutvinning. Det är inte uteslutet att vissa ståndpunkter visar sig behöva modifieras vid närmare analys, och det är dessutom mycket troligt att fler aspekter finns som visar sig behöva behandlas.

Dock har jag här försökt ge en översiktlig bild av de rättsfrågor som förefaller bli typiska för denna form av energiutvinning. Resonemanget om rätten till energi kommer i framtiden att behöva fördjupas, men problemet som sådant är - det kan man inse redan nu - av grundläggande betydelse också för andra energiutvinningsformer som ännu inte är lagreglerade. Ytjordvärmeutvinning kan ställas mot samma resonemang, liksom utvinning av vindenergi och direkt infallande solenergi. Ju förr dessa allmänna frågor analyseras grundligt, desto enklare kommer det att bli att etablera anläggningar och införa olika system för energiutvinning i landet eller delar av det. Planlagstiftningen bör tidigt anpassas till dessa eventualiteter.

## 12.7 Sammanfattning

### 12.7.1 Inledning

Särskild lagstiftning för sedimentvärme saknas. Hittillsvarande energilagstiftning har främst gällt vattenkraft, torv, kol, olja, gas, ved och uran men däremot inte vind, sol eller jordvärme. Energilagstiftning finns också för planering. Den sammanlagda energilagstiftningen är dock utvecklad och inte samordnad.

Föreliggande undersökning utgör första delen i ett delprojekt som ska belysa rättsfrågor kring sedimentvärme. Den första delen undersöker nu gällande lagstiftning för att finna regler, som får betydelse för genomförandet av sedimentvärmeutvinning. Utgångspunkt tas i de skydd som olika intressen har getts i lagstiftning. Innehavare av olika slags "rättigheter" till mark samt miljöskydd, naturvård, planering m. m. hör till de intressen, vars skydd får betydelse.

### 12.7.2 Ianspråktagande av mark med mera

För att placera en värmväxlare på mark (inbegripet sjöbotten) krävs medgivande från markägaren. Expropriation är antagligen inte möjlig så som lagstiftningen är för närvarande, främst därför att värmväxlaren inte bara utnyttjar visst markutrymme (som är den typiska expropriationssituationen) utan också energi i marken, och detta gör att expropriationsanledningarna i 2 kap. expropriationslagen inte täcker sedimentvärmväxlaren.

Däremot kan transportledningarna från värmväxlaren till förbrukningsställen vanligen läggas på lämplig mark med stöd av ledningsrättslagen. Också pumphus och liknande kan på samma sätt läggas på annans mark tvångsvis.

Ersättning för tvångsvis användning utgår enligt principerna i expropriationslagen.

Sannolikt kommer åtminstone mer omfattande anläggningar i vattenområden att kräva tillstånd som byggande i vatten.

### 12.7.3 Rätten till utvinning av energi

Det är viktigt att minnas att detta avsnitt är preliminärt vad gäller resonemang och slutsatser. Energi som lagrats i jord, vatten etc. har inte varit föremål för speciell lagstiftning och någon särskild energirätt finns inte i svensk rättstradition. Däremot finns i svensk rätt en mängd andra regler som anger vem som har rätt till energi i olika former. Lagrad energi i växtmaterial (gröda, ved) tillkommer i princip markägaren. Energi lagrad i fossil är däremot vad gäller utvinning specialreglerad på ett sätt som sätter markägarens monopol åt sidan. Motsvarande gäller för uran. Dessa koncessionslagstiftningar bygger på principer som länge funnits i gruvlagstiftning. Också vattenlagstiftning kan till en del ses som koncessionslagstiftning i vid mening.

I sådana konkurrenssituationer och intressekonflikter där olika markägare konkurrerar om energin som finns på den enes mark, torde - även om lagstiftning inte finns för dessa situationer - domstolarna döma på det sättet, att var och en råder över energin som finns på dennes mark. Olika skäl för detta har förts fram i avsnittet, där jag också diskuterar om tänkbara principer för en framtida reglering av rätten till energi från flödande källor.

### 12.7.4 Sedimentvärmeutvinning och miljörätten

Naturvårdslagen kräver försiktighet vid alla åtgärder som kan påverka naturmiljön. Samråd krävs med länsstyrelsen om påverkan kan bli allvarlig och länsstyrelsen får kräva begränsningar och andra försiktighetsmått.

Också miljöskyddslagen kan bli tillämplig, eftersom temperaturförändringar i vattenområden sannolikt kommer att behandlas som förorening likställd med utsläpp av kylvatten. Den lagen kan hindra viss placering av en verksamhet samt medför ibland ganska kostsamma försiktighetsmått, i vissa situationer till och med direkt förbud mot verksamheten.

Vätskan i anläggningen innebär att inte bara miljöskyddslagen utan också lagen om hälso- och miljöfarliga varor och hälsovårdsstadgan blir tillämpliga. Detta kommer normalt inte att medföra ytterligare skärpningar för verksamheten (i vissa situationer är det dock möjligt) men innebär att fler myndigheter kan komma in i frågan.

#### 12.7.5 Andra rättsliga frågor

Här noteras bara att ankringsförbud kan behövas och sådant utfärdas av länsstyrelsen enligt sjötrafikförordningen. Intressekonflikter med fiskerättshavare hör främst till miljöfrågorna i föregående avsnitt, men anläggningsarbetenas inverkan bedöms som byggande i vatten av vattendomstol.

12.8 Noter

1. Expropriationslagen 2:3.
2. 1973:1144.
3. Jfr. Ingelög, T.: Vedkraft - ett miljövänligt alternativ?  
I Sveriges Natur 1979:6 s. 247.
4. Se 1 och 20 §§ naturvårdslagen.
5. Nationalpark, naturreservat m.fl.
6. Se 1 § miljöskyddslagen.
7. Westerlund, S.: Miljöfarlig verksamhet, Lund 1975, s. 56 f.
8. Not 4.
9. Se Jonzon - Delin - Bengtsson: Naturvårdslagen. Stockholm 1976,  
s. 158 ff.
10. Op. cit. s. 162.
11. Op. cit. s. 161 f.
12. Utredds närmare i Westerlund, S.: Naturvård och pågående mark-  
användning, Helsingborg 1980, s. 287 ff.
13. 20 § naturvårdsförordningen.
14. 20 § 1 st. 2 p. naturvårdslagen.
15. Se Westerlund, Miljöfarlig verksamhet, kap. 3.
16. Se proposition 1969:28, s. 179 och 262.
17. 1 § 1 st. 3 p. miljöskyddslagen.
18. 4 §. Se Westerlund, Miljöfarlig verksamhet, kap. 12.
19. Se op.cit.kap. 6.
20. Se prop. 1969:28 s. 210 och 260.
21. 1973:329, särskilt 5 § .
22. 38 § hälsovårdsstadgan.

- Axelsson, V., Håkansson, L 1971: Sambandet mellan kvicksilverförekomst och sedimentologisk miljö i Ekoln. Del 1 och 2.  
UNGI Rapport 11, Naturgeografiska inst. Uppsala.
- Blomquist, N., Jacobsson, L., 1978: Förstudier av byggnadsuppvärmning med jordvärmepump. Förutsättningar i befintlig bebyggelse. BFR Rapport R 94:1978
- Bäckström, B., 1979: Värmepumpanläggning med insjö som värme-källa. BFR Rapport 29:79
- Carlsson, B., Stymne, H., Wettermark, G., 1978: Lagring av värme. En översikt av metoder och möjligheter. BFR Rapport R70:1978
- Crank, J., 1975: The mathematics of diffusion.  
Clarendon Press, Oxford, England
- Davin, B., Nordling, J., Sandart, K., 1978: Sjöar och hav som värmekälla för en värmepumpanläggning. Förstudie.  
Skrift från Orrje och Co, Scandiakonsult, Stockholm.
- Falkenmark, M., 1975: Yttre vattenomsättning i större svenska sjöar. Vatten, 31, nr.1, 1975.
- Granholm, H., 1971 : Om frostens nedträngande i marken med särskild hänsyn till möjligheten att förhindra tjälskador.  
Chalmers tekn. högsk. handlingar nr.332, Göteborg.
- Hansen, K., 1959: The terms Gyttja and Dy.  
Hydrobiologia Vol. 13, pp. 309 - 315, Den Haag
- Hansen, K., 1962: The dystrophic lake type.  
Hydrobiologia, 19, Den Haag.
- Holdar, C.G., Sahlström, K.E., 1957: Atlas över Sverige. Blad 35-36.
- Hutchinson, G.E., 1959: A treatise on limnology. Volume I.  
John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Håkansson, L., 1975: Kviksilver i Vänern - nuläge och prognos.  
SNV PM 563. NLU Rapport 88. Statens Naturvårdsverk.
- Håkansson, L., Ahl, T., 1976: Vättern - recenta sediment och sedimentkemi. SNV PM 740, NLU Rapport 88, Statens Naturvårdsverk.



- Håkansson, L., 1978: Vänerns morfometri och morfologi - en sjö-  
morfoteknisk handbok. Naturvårdsverket.
- Häggkvist, K., 1978: Utnyttjande av låggradig värmeenergi i sjöar.  
Högskolan i Luleå, avd. för vattenteknik, Serie A nr. 20.
- Johansen, Ø., 1975: Varmeledningsevne av jordarter (Thermal  
Conductivity of Soils), Institutt for køleteknik, Norges  
tekniske høyskole, Trondheim, Norge.
- Karlgren, L., 1974: Sjön som miljö.  
Fältbiologi för ungdom nr. 6. Fältbiologerna, Stockholm.
- Kraft, H., Ferm, M., Hill, A., 1979: Värmepumpar för bostadsupp-  
värmning. Komponent- och systemstudier.  
BFR Rapport R 14:1979.
- Likens, G.E., Johnsson, N.M., 1969: Measurement and analysis  
of the annual heat budget for the sediments in two Wisconsin  
lakes. Limnology and Oceanography, 14:1, 1969.
- Lind, G., Falkenmark, M., 1972: Hydrologi. En inledning till vatten-  
resursläran. Studentlitteratur, Lund.
- Lundqvist, G., 1942: Utvecklingshistoriska insjöstudier i sydsverige.  
SGU Ser. C. No. 330.
- Lundqvist, G., 1924b: Sedimenttyper i insjöarna. GFF Bd 46 p. 72-73.
- Lundqvist, G., 1937: Sjösediment från Rogenområdet i Härjedalen.  
SGU Ser. C. No. 408.
- Lundqvist, G., 1939: Sjösediment från området Abisko- Kebnekaise.  
SGU Ser. C. No. 423.
- Lundqvist, G., 1940: Sjösediment från Gotland.  
SGU Ser. C. No. 434.
- Lundqvist, G., 1942: Sjösediment och deras bildningsmiljö.  
GFF Ser. C. No. 446, Stockholm.
- Magnusson, N.H., Granlund, E., Lundqvist, G., 1949: Sveriges geologi.  
Stockholm.
- Moberg, A., 1967: Svenska sjöars isläggings- och islossningstid-  
punkter. SMHI, Notiser och preliminära rapporter.  
Serie Hydrologi nr. 4, 1967.

- Musman, S., 1968: Penetrative convection.  
J: Fluid Mech., Vol. 31, part 2, pp 343 - 360.
- Ottesen Hansen, N.-E., 1978. Mixing processes in lakes.  
Nordic Hydrologi, 9, 1978, pp. 57 - 74.
- Ratcliffe, E.H., 1960: The Thermal Conductivity of Ocean Sediments.  
J. Geophys. Res., Vol. 65, No. 5, pp. 1535 - 1539.
- Saare, E., Wenner, C.G., 1957: Värmeledningstal hos olika jordarter. Statens nämnd för byggnadsforskning. Handlingar Nr. 31, Norrköping.
- Sundberg, J., 1979: Metoder för bestämning av termiska parametrar i berg och jord.  
Geologiska inst., CTH/GU, Publ. B 132, Göteborg
- Svensson, U., 1978: Examination of the thermal structure of stratified lakes. In "Modelling of dynamic phenomena in lakes", Ed. Lars Bengtsson, Div. Wat. Resource Eng., Univ. of Luleå, Series A, No. 10.
- Thandertz, L., 1973: Heat budget studies.  
In "Dynamic studies in lake Velen" Ed. M. Falkenmark, IHD report No. 31, NFR, Stockholm.
- Turner, J.S., 1973: Buoyancy effects in fluids.  
Cambridge University Press.

Inventering av befintliga värmepumpsanläggningar som utnyttjar  
värme från sediment och vatten

Uppgifter om befintliga och planerade anläggningar kan förväntas finnas hos tillverkare, leverantörer och konsulter med inriktning på värmepumpsteknik. Följande företag har kontaktats:

	<u>Tel.</u>
1) <u>Aga-Thermia</u> tillverkare av värmepumpsystem etc. (spec. ytjordvärmesystem).	0570-13050
2) <u>Osby-Völund AB</u> tillverkare av värmepumpsystem etc. (spec. ytjordvärmesystem)	0479-14400
3) <u>Reindl</u> , leverantör av värmepumpar	0340-14320
4) <u>BOTO - Litoverken</u> tillverkare av värmepumpsystem etc. (spec. ytjordvärmesystem)	0300-41010
5) <u>Seleko AB</u> leverantör av bl.a. Westinghouse värmepumpar.	08 - 160090
6) <u>Stal Refrigeration AB</u> tillverkare av värmepumpar m.m.	<u>Tel.</u> 08-282900 011-139800
7) <u>Sediko-Energi AB</u> Innovationsbolag, utveckling av energiproduktion m.m.	0152-16075
8) <u>Termo-Frost Energiteknik</u> Utveckling av värmepumpsystem och värmeväxlare	08-258050
9) <u>Studsvik Energiteknik AB</u> .	0155-80000
10) <u>Joel Österbergs Ingenjörbyrå AB</u> , Malmö	040-103900
11) <u>Sydkraft, Malmö</u>	040-245000

Av de uppgifter som erhållits framgår att det i dag torde finnas kanske så många som ett 100-tal sjöbottenvärmväxlare i bruk och ett antal planerade. Samtliga befintliga anläggningar är av en storlek som motsvarar uppvärmningsbehov och tappvarmvattenbehov för ett enfamiljs-hus. Större anläggningar finns dock planerade.

En av kontakterna har uppgivit att man installerat ett antal sjöbottenvärmepumpar men har inte velat lämna närmare upplysningar om dessa. I ett fall (Dals Ed kommun) har kommunens byggnadsnämnd avslagit en begäran att få utnyttja en sjö som värmekälla.

Av de anläggningar som vi fått uppgifter om har sex st besökts för närmare studium och i ytterligare några fall har ägarna kontaktats per telefon. En större, planerad anläggning för Ö. Greviefolkhögskola har besökts och diskuterats med konsult och beställare. Dessa anläggningar beskrivs kortfattat på följande sidor.

Sammanfattningsvis har inventeringen givit följande resultat:

- o Ett antal ( < 100 ) anläggningar av villastorlek har byggts.
- o Utförda anläggningar använder bottenförlagda polyetenrör som värmeväxlare och en glykolvattenblandning som värmebärare.
- o Erfarenheter av drift och underhåll är kort, ett till två år, men de anläggningar som påträffats i insjöar synes ha fungerat väl.
- o I två fall har polyetenslangen skadats och glykolblandningen läckt ut. Dessa var placerade i en havsvik resp. ett vattendrag.

## Objekt 1.

Sjötyp, storlek m.m.: Stommsjön. Tranemo

Storlek ca 750 x 500 m. Djup ca 5-10 m. Sjön har ett lager av lösa sediment ovanpå ett lager av grus. PH ca 7,0. Tidigare utsläpp av syra. Fisk finns i sjön.

Typ av värmeväxlare: Rör av PEL.

Rörlängd i sjö: 300 m

Övrig rörlängd (transportsträcka): 100 m

Dimension: Diameter 40 mm

Förankring: 150 kg runt röret lindad blykabel, 5-meters längder var 5:e meter..

Förläggning i sjö: Ligger på botten ca 5-10 m djup under vattenytan.

Övrigt: 110 l glykol som fryspunktsnedsättande medel.

Typ av byggnad: 1 1/2-plans hus med källare. Bostadsyta 210 m<sup>2</sup>.

Övriga uppvärmda ytor ca: 40 m<sup>2</sup>. (K-värde ytterväggar 0,23, k-värde tak 0,16, k-värde golv 0,23. Treglasfönster). Självdragsventilation. Byggnadsår 1978.

Värmepump och övrigt uppvärmningssystem etc: Värmepump typ AGA-THERMIA typ JBC-400. Kompressor med effekt 3800 W. Värmepumpen skall täcka uppvärmningsbehov samt värma tappvarmvatten. Byggnaden uppvärms via vattenburen radiatorvärme.

Övrigt: Fler kommer troligtvis att utnyttja sjön.

## Objekt 2.

Ambjörnarp.

Sjötyp, storlek m. m.: Bysjön. Storlek längd 2 km, bredd 300 m, djup ca 2 m. Har ett lager av lösa sediment ovanpå ett lager av grus. Mycket fiskrik.

Typ av värmväxlare: Rör av PEL, NT4

Rörlängd i sjö: 400 m

Övrig rörlängd (transportsträcka): 100 m

Dimension: Diameter 40 mm.

Förankring: 60 stycken vikter à 2 kg av betong med rep förtöjda i röret.

Förläggning i sjö: Rören ligger på eller eventuellt delvis i botten-sedimenten. Djup ca 2 m under vattenytan.

Övrigt: Fryspunktsnedsättande medel av glykol, ca 120 l.

Typ av byggnad: 1 1/2-plans villa med källare av äldre typ. (Väggarna består av 2" plank + 5 cm mineralull + tegel).

Värmepump och övrigt uppvärmningssystem etc.:

Värmepump typ AGA-THERMIA JBC-400.

Kompressor med en effekt av 3.800 W.

Värmepumpen skall täcka uppvärmningsbehov samt värma tappvarmvatten. Dock finns en befintlig oljeeldad värmepanna som kan parallellköras vid behov. Byggnaden uppvärms via vattenburen radiatorvärme. Värmepumpen är ej helt färdig-installerad (inskränning av ledningar kvarstår).

Övrigt: Tidigare förbrukning av olja ca 3 m<sup>3</sup>.

## Objekt 3.

Ambjörnarp.

Sjötyp, storlek m.m.: Kyrksjön. Sjön är ca 500 m lång och 150 m bred. Har mycket stor genomströmning (fryser ej helt på vintern). Har ett lager av lösa bottensediment ovanpå ett lager av grus. Djup ca 1,5 - 3 m. Max.djup 4 m. Fiskrik.

Typ av värmeväxlare: Rör av PEL. NT4.

Rörlängd i sjö: 400 m

Övrig rörlängd (transportsträcka): 50 m

Dimension: Diam. 40 mm

Förankring: 70 stycken vikter av betong a 2 kg förtöjd i röret med nylonrep.

Förläggning i sjö: Rören ligger på eller eventuellt delvis i botten-sedimenten. Djup 1,5 - 3 m under vattenytan.

Övrigt: Har glykol som fryspunktsnedsättande medel.

Typ av byggnad: Ca 300 m<sup>2</sup> bostadsbyggnad av äldre typ. (Väggar av 2" plank + 5 cm mineralull + tegelfasad).

Värmepump och övrigt uppvärmningssystem etc.:

Värmepump typ AGA-THERMIA JBC-400. Kompressor med en effekt av 3800 W. Värmepumpen skall täcka uppvärmningsbehov samt värma tappvarmvatten. Dock finns en befintlig oljeeldad värmepanna som kan parallellköras vid behov. Byggnaden uppvärms via vattenburen radiatorvärme. Anläggningen installerades i augusti 1979.

Övrigt: Särskilt elmätare för värmepumpen är monterad. Tidigare förbrukning av olja var ca 6-7 m<sup>3</sup>.

## Objekt 4

Sjötyp, storlek m.m.: Skäremosjön. Tranemo.

(Sjön är ca 2 km lång, ca 600-700 m)

Fiskrik.

Typ av värmeväxlare: Rör av PEL.

Rörlängd i sjö: 200 m

Övrig rörlängd (transportsträcka): 200 m

Dimension: Diameter 40 mm

Förankring: Blytyngder

Förläggning i sjö: Ligger på botten, maximalt djup under vattenytan ca 3,5 m. Strandkanten bestod av grus.

Övrigt: Fryspunktsnedsättande medel glykol (50 %).

Typ av byggnad: Enplanshus med källare, bostadsyta 114 m<sup>2</sup>, byggnadsår 1978. (K-värde väggar ca 0,24. Översta bjälklag 27 cm mineralullsisolering. Bottenplatta helgjuten med 10 cm mineralullsisolering): Mekanisk ventilation.

Värmepump och övrigt uppvärmningssystem etc.:

Värmepump typ AGA-THERMIA JBC-400. Kompressor effekt 3800 W.

Värmepumpen skall täcka uppvärmningsbehov samt värma tappvarmvatten.

Byggnaden uppvärms via vattenburen radiatorvärme.



## Objekt 5

Tranemo.

Sjötyp, storlek m.m.: Pjukasjön. Storlek, längd av 1 km, bredd av 200-300 m, djup ca 2-3 m. Maximalt djup ca 4 m. Sjön har lösa och dyiga sediment. Sjön är fiskrik. (Abborre, mört, gädda och ål).

Typ av värmeväxlare: Rör av PEL.

Rörlängd i sjö: 300 m

Övrig rörlängd (transportsträcka): 5 m

Dimension: Diameter 50 mm

Förankring: 1 tegelsten + koppartråd var tionde meter.

Förläggning i sjö: Rören ligger på eller delvis i bottensedimenten.

Djup ca 2-3 m under vattenytan.

Övrigt: Utgående rörledning vid stranden flöt upp och frös fast i isen. Glykol utnyttjas som fryspunktsnedsättande medel. Rörets förläggning i sjön visas med flöten på vattenytan.

Typ av byggnad: Nyrenoverad samt tillbyggd, äldre byggnad, ca 170 m<sup>2</sup> bostadsyta.

Värmepump och övrigt uppvärmningssystem etc:

Värmepump typ AGA-THERMIA JBC-400.

Kompressor med effekt av 3 800 W.

Värmepumpen skall täcka uppvärmningsbehov samt värma tappvarmvatten. Dock finns en befintlig oljeeldad panna som reserv. Anläggningen installerades år 1978.

Östra Grevie folkhögskola  
=====

Underlag för inventering: Folkhögskolan besöktes och Joel Österbergs Ingenjörbyrå AB 1979-09-05. Förstudie av J.Österbergs Ing.byrå AB.

Inventering

Östra Grevie folkhögskola har beslutat att uppföra ett antal nya byggnader i anslutning till den befintliga skolan. Total byggnadsvolym beräknas bli ca 12000 m<sup>3</sup>. Maximala effektbehovet beräknas bli ca 179 kW under uppvärmningssäsongen. Total erforderlig årsenergi för nybyggnationen beräknas bli 486 000 kWh/år. Joel Österbergs Ing.byrå har i en förstudie studerat olika alternativa möjligheter då värmepump användes som energikälla.

Som energikälla till värmepumpens förångare har bl.a. diskuterats att lägga en värmeväxlare i form av rörslingor i en närbelägen damm. Dammens yta är ca 20 000 m<sup>2</sup>, djupet varierar mellan 2-4 m. Eventuellt kommer värmeväxlaren att delas upp i två delar varav halva rörlängden lägges på dammens botten och resterande lägges i marken bredvid dammen såsom ytjordvärmesystem. Total rörlängd anges till 6000 m. Slingorna som eventuellt nedsänkes i dammen kommer att vara 40 mm polyetenrör som förses med blytyngder. Slingorna delas upp i ett antal sektioner som kan regleras genom strypdon var för sig. Antages dammen sörja för halva energibehovet under ett år kan ett mått på dess utnyttjning anges i medeltal såsom ca 12 kWh/m<sup>2</sup> år.

Vid kontakt med skolans biolog Yngve Persson framgick följande: Dammen är mycket fiskrik. (Abborre, gädda, ål, brax och sutare). Provtagning av vattnet hade tagits med hänsyn till bad och visade god kvalitet.






Vegetationen domineras av kransalger. Kransalger bildar torv på dammens botten. Utefter stränderna fanns bl.a. andmat, dyblad och vass. Vattnets pH-värde är enligt uppgift högt då marken är kalkrik. Dammen bör ha ett väl fungerande ekosystem.

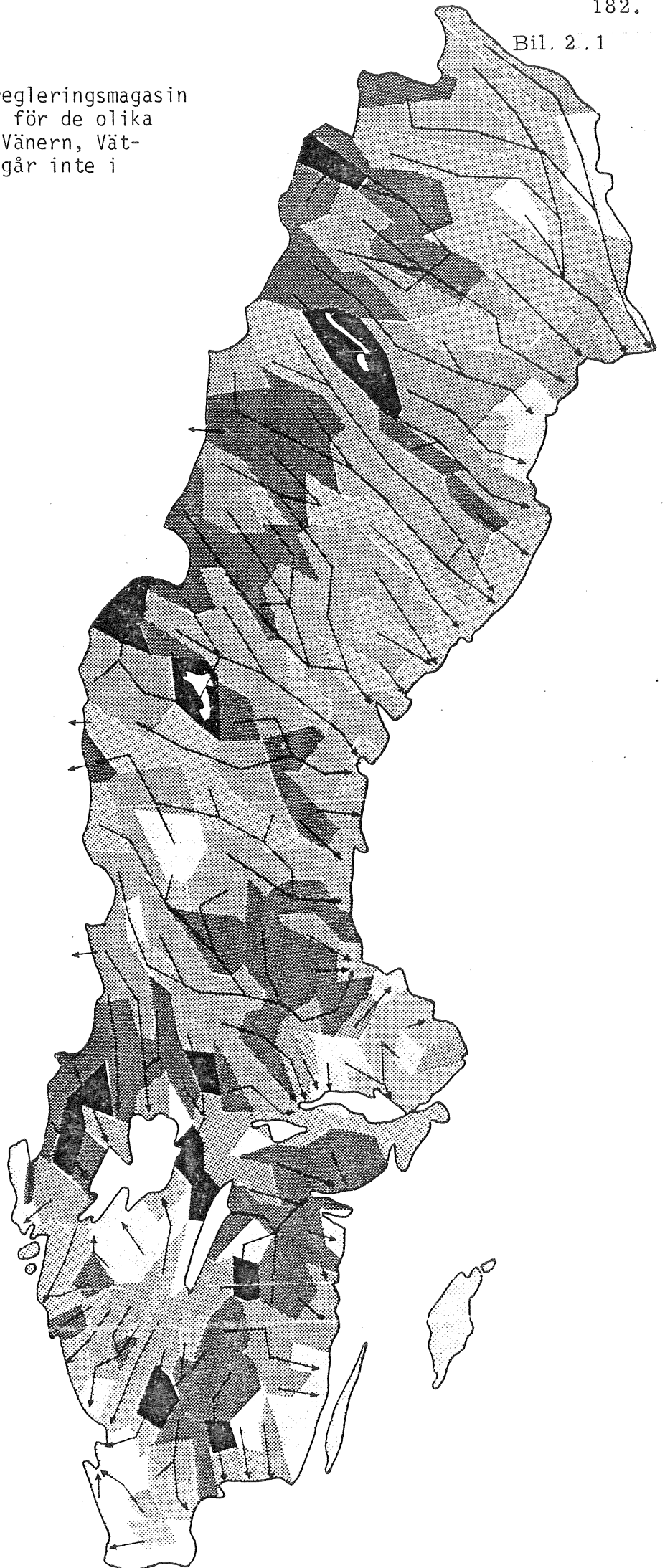
## Karta 19 SJÖPROCENT

Bil. 2.1

Kartan visar andelen sjö och regleringsmagasin av mark- och inlandsvattenytan för de olika redovisningsområdena. Sjöarna Vänern, Vättern, Mälaren och Hjälmaren ingår inte i redovisningen.

## TECKENFÖRKLARING






	0 - 1,9 %
	2,0 - 3,9 "
	4,0 - 7,0 "
	8,0 - 15,9 "
	≥ 16,0 "

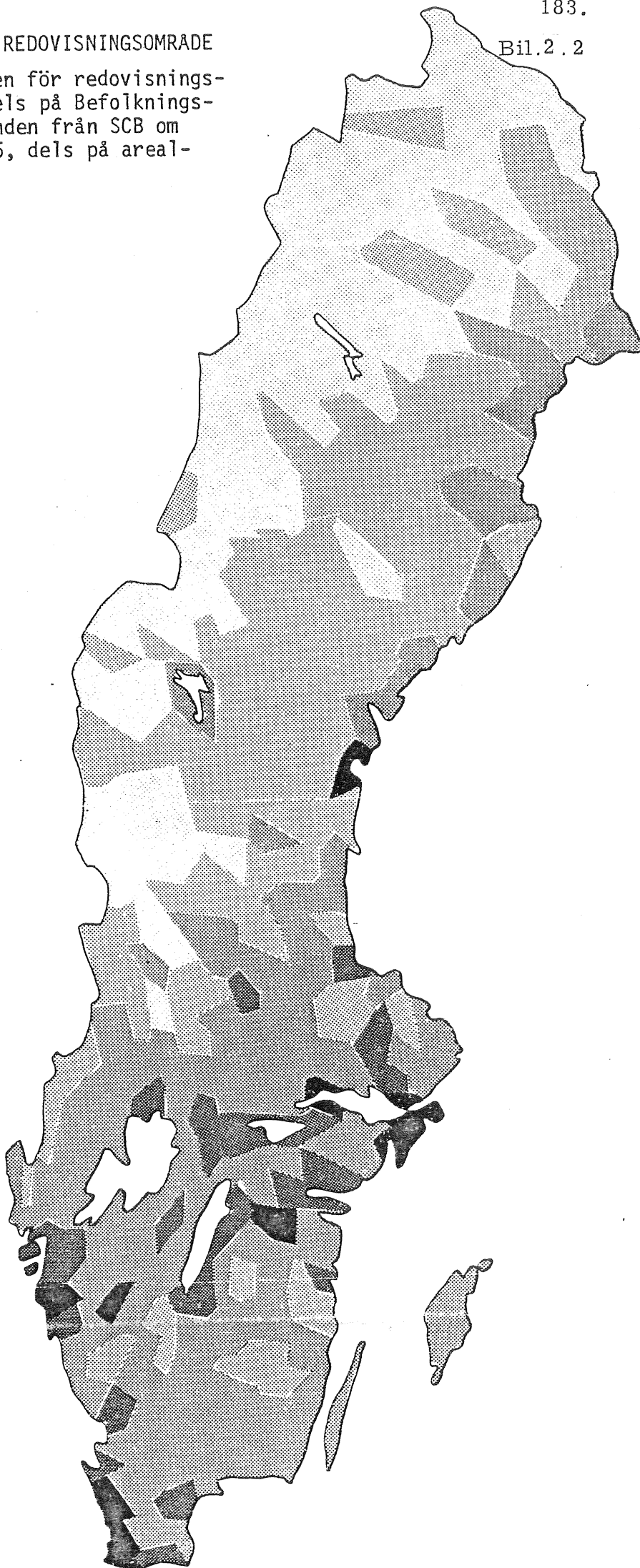


## Karta 7 BEFOLKNINGSTÄTHET PER REDOVISNINGSSOMRÅDE

Kartan visar befolkningstätheten för redovisningsområden. Uppgifterna grundas dels på Befolkningskarta 1970 och på pressmeddelanden från SCB om Folk- och bostadsräkningen 1975, dels på arealuppgifter i tabell 1.

## TECKENFÖRKLARING

	0- 0,9	inv/km <sup>2</sup>
	1- 9	"
	10- 49	"
	50- 99	"
	100-	"



## :7 Sjöar och vattendrag

### :71 Sjöar

#### :711 Allmänt

Av Sveriges yta utgörs 8,5% av sjöar, dvs 40 000 km<sup>2</sup> av totala 450 000 km<sup>2</sup>. De största sjöarna är Vänern, Vättern, Mälaren och Hjälmaren, vilka har areorna 5 550, 1 899, 1 140 respektive 493 km<sup>2</sup>. Av världsdelenas sammanlagda yta beräknas ca 1,5% bestå av sjöar.

Magasineringen i sjöarna är av stor betydelse för utjämning av vattenföringen. Under perioder med liten nederbörd eller då nederbörden är bunden i form av snö hålls vattenföringen uppe genom naturlig avsänkning av sjömagasinen. Genom magasinering under nederbördsrika perioder reduceras däremot vattenföringens maximivärde och dess inträffande i tiden fördröjs. Som ett mått på ett avrinningsområdes magasineringsförmåga anges vanligen dess sjöprocent, dvs förhållandet mellan sjöarea och total area. I de flesta fall växer kvoten mellan normal högvattenföring och normal lågvattenföring med sjunkande sjöprocent.

#### :712 Temperatur- och stabilitetsförhållanden

Sjöarnas vattenmassor är mestadels skiktade med lättare vattenskiakt överlagrande tyngre. Det förhållandet att sötvatten har sitt densitetsmaximum vid +4°C ger därvid upphov till en årstidsbunden vertikal cirkulation.

I fig :712 visas exempel på uppmätta temperaturfördelningar. Under sommar och vinter är skiktningen stabil — lättare vatten överlagrar tyngre. Under vår och höst uppvärms respektive avkyls ytvattnet och dess temperatur måste passera +4°C. Vid något tillfälle uppstår då instabil skiktning — tyngre vatten överlagrar lättare vatten, vilket medför en vertikal omblandning av vattnet, vår- och höstcirkulation.

Under sommaren tillförs sjön värme från atmosfären. Värmen transporteras från ytskiktet ned till djupare lager genom molekylär värmeledning och turbulent blandning. Värmetillförseln är emellertid ofta större än den vertikala transporten i sjön varför de övre vattenmassorna får en avsevärd temperaturhöjning. Temperaturdifferenserna inom dessa är däremot ganska små beroende på att ytvattnet avkyls under natten, så att skiktningen blir instabil och en vertikal omblandning erhålls. Det kallare vattnet nedtränger till den nivå där dess densitet överensstämmer med det omgivande vattnets. Till homogeniseringen av de övre vattenlagren bidrar även den turbulens och de strömmar som genereras av vinden. Under det varma och nästan temperaturhomogena övre skiktet, *epilimnion*, avtar temperaturen med ökat djup, först snabbt, sedan långsammare, för att i bottenvattnet, *hypolimnion*, ha sitt minimum. Mellan epilimnion och hypolimnion föreligger alltså en stor densitetsskillnad. Man säger att det utbildas ett *sprängskikt*, *metalimnion*. I sjöar med litet djup uppträder detta sprängskikt endast temporärt (fig :712).

Differensen i densitet mellan olika vattennivåer är ett mått på vattenmassornas vertikala stabilitet. Denna brukar beskrivas med hjälp av densitetsgradienten  $d\rho/dz$ , där  $\rho$  är vattnets densitet och  $z$  är en vertikal koordinat räknad positiv nedåt. Ju större  $d\rho/dz$  är desto mer energi krävs för att lyfta upp en vätskevolym till en nivå med mindre densitet, dvs för att åstadkomma en omblandning. Om  $d\rho/dz < 0$  är skiktningen instabil.

I sprängskiktet har  $d\rho/dz$  maximum. Detta utgör alltså en mer eller mindre kraftig spärr för vattenutbytet mellan epilimnion och hypolimnion. Den turbulens, dvs de virvlar som genereras av vinden i ytskiktet dämpas i sprängskiktet varigenom den turbulenta transporten av exempelvis värme och syre ned i hypolimnion försvåras. Inte heller kan vatten från sjöns tillflöde i nämnvärd grad tränga genom sprängskiktet. Hypolimnion är därför under sommaren att betrakta som mer eller mindre stillastående.

#### :713 Vindpåverkan

##### Vindkrafter

De av vinden genererade strömmarna har stor betydelse för de horisontella och vertikala transporterna i en sjö.

Vinden utövar på vattenytan en skjuvspänning  $\tau_w$ , vilken brukar ansättas

$$\tau_w = \xi_1 \rho_1 w_{10}^2 \quad [\text{N/m}^2] \quad (1)$$

där  $w_{10}$  är vindhastigheten i m/s på 10 m höjd över vattenytan,  $\rho_1$  luftens densitet i kg/m<sup>3</sup> samt  $\xi_1$  en av vindstyrka, vindriktning, sjöstorlek och vågbildning beroende dimensionslös koefficient, vars värde inte användningsfritt kunnat bestämmas. För större vattenområden anges dels att  $\xi_1 = \text{ca } 0,8 \cdot 10^{-3}$  om  $w_{10} < 6$  m/s, dels att  $\xi_1 = \text{ca } 2,6 \cdot 10^{-3}$  om  $w_{10} > 6$  m/s.

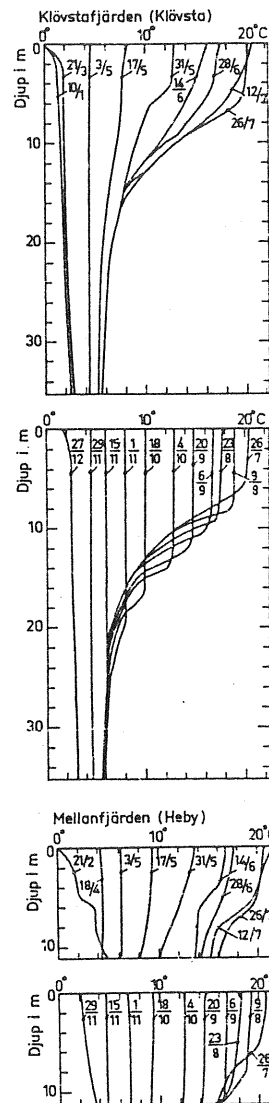


Fig :712. Temperaturprofiler i Klämningen (medeltal 1/5 1941-30/4 1944) [51]

### Nivellering av vattenyta och språngskikt

Under förutsättning att sjön har reguljär form och ett approximativt konstant djup  $D_0$  kan vattenytans lutning  $i_0$  vid stationärt tillstånd, dvs konstanta vindförhållanden under en längre period, uppskattas. För en densitets-homogen sjö erhålls

$$i_0 = k_1 \tau_w / \rho g D_0 \quad (2)$$

där koefficienten  $k_1$  är av storleksordningen  $1 < k_1 < 1,5$ . För en sjö med ett utpräglat språngskikt på djupet  $D_s$  under vattenytan fås

$$i_0 = k_1 \tau_w / \rho g D_s \quad (3)$$

Språngskiktets lutning  $i_s$  ges av sambandet

$$i_s \approx -(\rho / \Delta \rho) i_0 \quad (4)$$

där  $\Delta \rho$  är densitetsdifferensen mellan epilimnion och hypolimnion (fig :713b). Eftersom  $\Delta \rho / \rho \ll 1$  är alltså den motriktade snedställningen av språngskiktet mycket kraftigare än vattenytans nivellering.

### Genererade strömmar

Vindkrafterna längs vattenytan skapar en ytström huvudsakligen i vindens riktning. Den genererade ythastigheten  $u_y$  i stillastående vatten är approximativt proportionell mot vindhastigheten

$$u_y = \xi_s (\tau_w / \rho)^{1/2} = \xi_s (\xi_1 \rho_l / \rho)^{1/2} w_{10}$$

Den dimensionslösa koefficienten har vid laboratorieförsök approximativt bestämts till  $\xi_s \approx 13$ . Under fältförhållanden torde  $u_y$  vara av storleksordningen 1 à 2% av vindhastigheten.

Strömningshastigheten avtar snabbt med djupet under vattenytan för att under en viss nivå ha motsatt riktning. I en sjö utan språngskikt erhålls i princip den strömbild som redovisas i fig :713a. Strömningsbilden kan dock beroende på tex topografiska förhållanden bli mycket komplex. Om sjön har ett utbildat språngskikt kan en cirkulation enligt fig :713b erhållas.

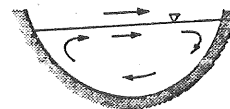


Fig :713a. Principskiss över vindcirkulation i en densitetshomogen sjö

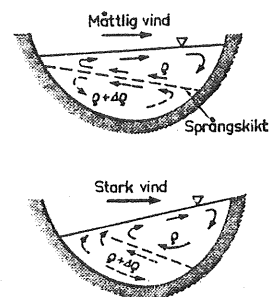


Fig :713b. Principskiss över vindcirkulation i en sjö med densitetssprångskikt

### :714 Seicher

Vid snabb ändring i vindkraft eller lufttryck uppkommer i vissa fall stående svängningar i vattenmassan, *seicher*. Vattenmassan kan härvid efter en störning under gynnsamma omständigheter fortsätta att skvalpa fram och tillbaka under flera dygn. Svängningsperioden bestäms av bäckenets form och storlek samt av vattnets skiktning. I samband med att sjöns vatten-

massa svänger transporteras stora vattenmassor fram och tillbaka och pulserande strömmar uppkommer. Seicher förekommer inte enbart i djupa sjöar, där friktionsmotståndet mot svängningen är relativt litet utan har även konstaterats i grunda sjöar. I Vallentunasjön, som är 5 m djup, har sålunda registrerats unidala svängningar, dvs stående våg med en nod i sjöns mittsektion, med en period av ca 46 min vilken överensstämmer med den teoretiska  $T = 50$  min beräknad ur sambandet [53]

$$T = (2/n) \int_0^L \frac{1}{\sqrt{gd}} dx$$

där  $L$  = sjöns längd i  $x$ -riktningen  
 $d$  = vattendjup  
 $n$  = antalet noder

Sambandet avser densitetshomogen sjö.

### :715 Strömningsförhållanden

Strömningsbilden i en sjö är oftast mycket komplicerad och sammansatt av en serie *komponentsströmmar* nämligen genomströmning, densitetsströmmar, vindströmmar och seichströmmar.

1 *Genomströmningen*, dvs förhållandet tillrinning-avrinning i ett system, går ofta fram i ett begränsat skikt, särskilt då omblandningen mellan tillrinnande vatten och sjövattnet är ringa och då på den nivå där det genomströmmande vattnet återfinner sin egen densitet. Skiktets läge växlar alltför tillflödets densitet, omblandningens storlek samt densitetsskiktningen i vattenmassan. Graden av permanens i genomströmningssystemet beror bl a på relationen genomströmning/sjövolym samt på närheten mellan in- och utlopp. Är dessa närbelägna uppträder kortslutningseffekter. Dylka effekter kan för övrigt uppträda även vid industrier med intag och utsläpp i närheten av varandra.

2 *Densitetsströmmar* orsakas av att vatten vill sjunka i en lättare omgivning och stiga i en tyngre. De uppkommer i princip så snart obalans uppkommer i en vattenmassa, t ex genom olika uppvärmning eller avkyllning av grunda och djupa partier, och spelar en avgörande roll vid avkyllningen av en sjö under hösten. Genomströmningen går, som nyss nämdes, fram på olika nivåer vid växling i det tillrinnande vattnets egenskaper; bottennära strömmar uppträder om tillflödet är tungt genom hög halt av slam eller låg temperatur, ytnära strömmar däremot om tillflödet är lätt genom hög temperatur eller låg salt- eller slamhalt.

3 *Vindströmmar* dominerar vanligen under icke islagd tid. Karaktäristiskt för vindströmmar är att de är synnerligen växlande. Se vidare :713.

4 *Seichströmmar* (se :714).

Strömningsriktningarna kan även i små sjöar påverkas av jordrotationen (corioliseffekt). Denna vrider strömmen åt höger på norra halvklotet, åt vänster på det södra.

Eftersom många olika slags strömmar samtidigt kan förekomma i ett naturligt vatten, blir strömningsbilden normalt komplicerad och ofta snabbt växlande. Att genom mätningar fastlägga densamma helt, skulle kräva ett stort antal inbördes samtidiga mätningar över hela vattenområdet, upprepade med korta tids mellanrum. Sådana mätningar är som regel inte ekonomiskt genomförbara. I stället bestäms vanligen de stora dragen i strömningen genom någorlunda samtidiga översiktsmätningar, kombinerade med detaljstudium i några få vertikaler. För strömmätningen kan följande olika principer tillämpas:

*Trajektoriemätning*, varvid en strömbana följs med flytkropp (t ex strömkors, ytflottör). Vid vindpåverkan kan strömkorsets bana avvika starkt från den verkliga strömtrajektorien. En strömkorsmätning ger då efter korrigering endast medelhastigheter inom vissa områden och tidsrymder (se även :633).

*Punktmätning*, varvid strömningen mäts i en fix punkt med strömkors, propellerinstrument e d, eventuellt självregistrerande.

*Studium av spårämnesutbredning* (fluorescerande färg, radioaktiva isotoper, eventuella naturliga spårämnen eller egenskaper hos tillflödena m m).

## :716 Vattenutbyte

Man skiljer mellan yttre och inre vattenutbyte. Yttre vattenutbytet är det utbyte av vattenmassan som sker i en sjö genom systemet tillrinning-avrinning-avdunstning. Inre vattenutbytet i en sjö är utbytet mellan dess olika delar, t ex mellan en vik och utanföriggande djupområde och således bestämt av strömningsförhållandena. Det inre vattenutbytet varierar förutom med läget i sjön även med årstiden. Vattenutbytet kan inte anges genom något konstant tal, eftersom såväl skiktningförhållanden som vattenföring, vattenstånd och vindgenererade strömmar växlar.

Det yttre vattenutbytet har brukat beskrivas med en tidsparameter

$$T = W/q = \text{nominella utbytestiden (uppehållstiden)}$$

där  $W$  = sjöns volym

$q$  = genomströmmande vattenföring

Den nominella utbytestiden motsvarar att hela vattenmassan skulle utbytas i samma takt, vilket emellertid är orealistiskt: stora delar av vattenmassan deltar endast obetydligt, t ex avsnörda vikar, i det skiktade fallet går strömningen företrädesvis fram på den nivå som motsvarar tillrinningens densitet. Den är därför endast användbar för att få en allmän uppfattning om storleksordningen på uppehållstiden.

En approximativ uppskattning av utbytestiden kan förslagsvis baseras på effektiva volymer enligt nedan:

1 Under vår- och höstcirkulationen »ventileras» hela vattenmassan. Genomströmmande vatten kan blanda sig med hela vattenvolymer.

2 Under sommarstagnationen är hypolimnion överksam under det att epilimnion deltar i omsättningen och ventileras av vindar och temperaturströmmar. Den effektiva volymen sammanfaller i stort sett med epilimnion.

3 Under vinterstagnationen är omsättningen liksom under sommaren begränsad till epilimnion. Isläggning minskar vindarnas inverkan, varför den effektiva volymen blir begränsad även i horisontalled. Grunda vatten, vikar o dyl deltar inte i omsättningen.

Av i :715 skisserade mätmetoder för vattenutbytets bestämning ger spårämnesstudier ofta den bästa informationen.

Ett momentant utsläpp av spårämne i sjöns tillopp ger i utloppet en impuls av det utseende som skisseras i fig :716. Kurvans tyngdpunktskoordinat motsvarar spårämnets medeluppehållstid  $\bar{T}$  i sjön.  $\bar{T}$  understiger ofta kraftigt den nominella utbytetiden på grund av tidigare nämnd förekomst av stillastående områden. Koncentrationens tidsfördelning utgör en frekvensfördelning av förekommande uppehållstider.

Vid snabbt skiftande strömningsförhållanden, t ex på grund av vindkantning, kan momentan dosering ge felaktig eller mycket svårtolkad information. Ett spårämnesförsök bör därför inte inriktas enbart på bestämning av impulsen vid utloppet utan åtföljas av en kartering av spårämnesmolnets strömbana och utspädning, vindförhållanden, skiktningförhållanden och om möjligt strömningsbilden i stort. Med utgångspunkt från uppmätta utspäd-

ningsdata kan eventuellt en framintegrering göras av tillflödets utspädningförhållande. Vid komplicerade strömningsförhållanden föredras kontinuerlig dosering av spårämne under viss tid. Möjlighet erhålls då att mer direkt studera tillflödets fördelning i sjön. Om uppgift då även önskas om uppehållstider kan paralleldosering av två olika spårämnen tillgripas [52].

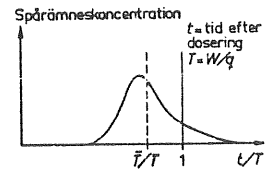
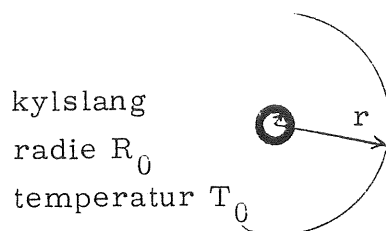


Fig :716. Impuls erhållen i utloppet från sjön till följd av en momentan spårämnesdosering i dess tillopp



## APPENDIX

1. Värmeupptagning genom radiell värmeledning i oändligt medium

Värmetransporten beskrivs av följande ekv.:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad \dots (1)$$

där  $T$  = temperaturen,  $^{\circ}\text{C}$

$t$  = tid, s

$\lambda$  = värmeledningstal,  $\text{W/m} \cdot ^{\circ}\text{C}$

$\rho$  = densitet  $\text{kg/m}^3$

$c$  = värmekapacitet  $\text{J/kg} \cdot ^{\circ}\text{C}$

$r$  = radiell koordinat

Sätt  $k = \lambda / \rho c$   $\text{m}^2/\text{s}$  = värmediffusivitet

Randvillkor:  $r \rightarrow \infty$   $T = T_a$

$r = R_0$   $T = T_0$  (värmemotståndet hos slangväggen försummas)

Begynnelsevillkor  $T = T_a$  för  $r > R_0$

Detta fall finns löst analytiskt i Crank (1975) med avseende på temperaturflödet,  $q$ .

För små tider är lösningen:

$$q = \frac{k(T_a - T_o)}{R_o} \left\{ (\pi A)^{-1/2} + \frac{1}{2} - \frac{1}{4} \left(\frac{A}{\pi}\right)^{1/2} + \frac{1}{8} A \dots \right\} \quad (2)$$

För långa tider erhålles:

$$q = \frac{2k(T_a - T_o)}{R_o} \left\{ \frac{1}{\ln(4A) - 2\gamma} - \frac{\gamma}{(\ln(4A) - 2\gamma)^2} - \dots \right\} \quad (3)$$

där  $\gamma = 0.5772 = \text{konstant}$

Den styrande parametern,  $A$ , ges av

$$A = \frac{kt}{R_o^2} \dots \quad (4)$$

För de värden på  $k$  och  $R_o$  som är aktuella gäller att  $A >$  tiden i dygn vilket innebär att ekv. (3) är tillämplig för tider  $> 10$  dygn.

Ekv. (2) och (3) ger temperaturflödet per ytenhet av slangen, dvs för  $r = R_o$ . För att få värmeflödet,  $Q$ , multipliceras med omkretsen och  $\rho \cdot c$ .

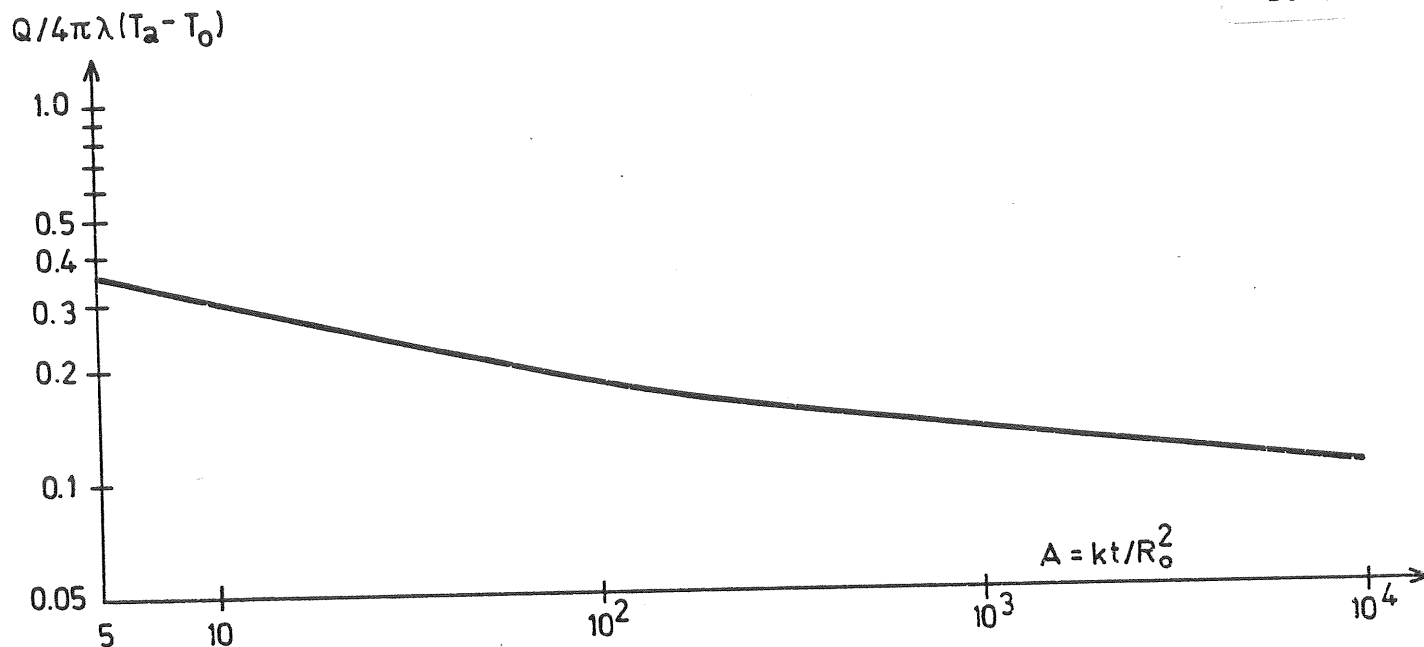
Ekv. (3) ger då:

$$Q = 4\pi \lambda (T_a - T_o) \cdot f(A) \dots \quad (5)$$

En dimensionslös formulering blir:

$$\frac{Q}{4\pi \lambda (T_a - T_o)} = f\left(\frac{kt}{R_o^2}\right) \dots \quad (6)$$

Funktionen  $f(A)$  visas i följande diagram.



Som exempel väljes att räkna på sediment bestående av gyttja (samma egenskaper som vatten) resp. lera med 65% porositet.

			Gyttja	Lera
$\lambda$	Värmeledningstal	W/m · °C	0.57	1.0
$\rho$	Densitet	kg/m <sup>3</sup>	1000	1640
$c$	Värme kapacivitet	J/kg · °C	$4.18 \cdot 10^3$	$2.20 \cdot 10^3$
$k$	Värmediffusivitet	m <sup>2</sup> /s	$0.00135 \cdot 10^{-4}$	$0.002710^{-4}$

För några olika värden på  $R_o$  får man följande värden på  $A$  som funktion av tiden i dygn,  $t'$ .

	Gyttja	Lera
$R_o = 2.5$ cm	$A = 18.7 t'$	$A = 37.3 t'$
$R_o = 5.0$ cm	$4.7 t'$	$9.3 t'$
$R_o = 10$ cm	$1.2 t'$	$2.3 t'$

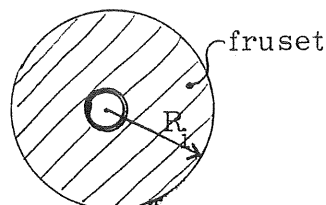
Under senare delen av uppvärmningssäsongen,  $100 < t < 200$  dygn, blir  $A$  för slang med radien 2,5 cm 1870 - 3740 för gyttja och 3730 - 7460 för lera. Funktionen  $f(A)$  får värdet 0.12 resp. 0.11 som medelvärde. Värmeupptagningen blir:

$$\text{Gyttja} \quad Q = 4\pi \cdot 0.57 \cdot 0.12 \cdot (T_a - T_o) = 0.86 (T_a - T_o) \text{ W/m}$$

$$\text{Lera} \quad Q = 4\pi \cdot 1.0 \cdot 0.11 \cdot (T_a - T_o) = 1.38 (T_a - T_o) \text{ --}$$

2. Värmeupptagning genom frysning

Frysning antas ske i en cirkulär cylinder med radien  $R_i$  runt kylslangen som har radien  $R_o$ . I det frusna området är värmeledningstalet  $\lambda_i$ , vilket är större än i den ofrusna omgivningen,  $\lambda$ .



En kontinuitetsekvation för energiflödet genom isfronten blir:

$$Q_{is} = Q - Q_y \quad \dots \quad (7)$$

där

$Q_{is}$  är isbildningsenergin

$Q$  är energiflödet i den frusna delen

$Q_y$  är energiflödet i den ofrusna omgivningen

Isbildningsenergin ges av följande ekvation om allt porvatten förutsättes frysa vid en temperatur av  $0^\circ\text{C}$ .

$$Q_{is} = 2\pi R_i \frac{dR_i}{dt} \cdot p \cdot \alpha = \pi p \alpha \cdot \frac{dR_i^2}{dt} \quad \dots \quad (8)$$

där  $p$  är porositeten

$\alpha$  är isbildningsvärmets  $= 333 \cdot 106 \text{ J/m}^3$

I den frusna sedimentvolymen antas ett kvasistationärt tillstånd med samma värmetransport,  $Q$ , genom alla ytor  $r < R_i$ . Detta ger:

$$Q = \lambda_i \cdot 2\pi r \frac{dT}{dr} \quad \dots \quad (9)$$

Integreras ekv. (9) erhålles:

$$\ln(R_i/R_o) = \frac{2\pi \lambda_i}{Q} (0 - T_o)$$

varav följer att värmeflödet blir

$$Q = \frac{2\pi\lambda_i(-T_o)}{\ln(R_i/R_o)} \quad \dots\dots \quad (10)$$

I den ofrusna delen ges värmeflödet approximativt av ekv. (6) med  $R_o$  ersatt av  $R_i$  och  $T_o = 0$ .

$$Q_y = 4\pi\lambda T_a \cdot f\left(\frac{kt}{R_i^2}\right) \quad \dots\dots \quad (11)$$

När isvolymen tillväxer blir  $Q_y$ , beräknad med ekv. (11) något underskattad. Felet bedöms dock bli litet, speciellt under den senare delen av uppvärmningssäsongen.

En lösning av detta problem kan erhållas för fallet att värmeupptagningen,  $Q$ , är konstant. Detta kan visas på följande sätt: Ge parametern  $kt/R_i^2$  i ekv. (11) ett konstant värde,  $A$ . Värmeflödet,  $Q_y$ , blir då konstant och istillväxten blir  $R_i^2 = kt/A$ . Härav följer att derivatan  $dR_i^2/dt = k/A =$  = konstant. Denna derivata insättes i ekv. (8) vilket ger att värmeupptagningen genom isbildning,  $Q_{is}$ , också blir konstant. Av ekv. (7) följer då att  $Q$  är konstant. Energiflödena  $Q_y$ ,  $Q_{is}$  och  $Q$  samt det frusna områdets radie,  $R_i$ , och temperaturen i slangen,  $T_o$ , kan beräknas med följande ekvationssystem.

$$Q_y = 4\pi\lambda T_a \cdot f(A) \quad \text{med } f(A) \text{ ur diagram} \quad \dots\dots \quad (12)$$

$$R_i = \sqrt{\frac{kt}{A}} \quad \dots\dots \quad (13)$$

$$Q_{is} = \pi p \alpha \cdot \frac{k}{A} \quad \dots\dots \quad (14)$$

$$Q = Q_y + Q_{is} \quad \dots\dots \quad (15)$$

$$(-T_o) = \frac{Q}{2\pi\lambda_i} \cdot \ln(R_i/R_o) \quad \dots\dots \quad (16)$$

Som exempel har beräkningar genomförts för samma material, gyttja och lera, vars egenskaper redovisats tidigare. Omgivningens temperatur sättes liksom tidigare till  $T_a = 6^\circ\text{C}$ . Värmeledningstalet i den frusna delen blir approximativt lika i de båda fallen,  $\lambda_i = 2,2 \text{ W/m}\cdot^\circ\text{C}$ . Resultatet

framgår av följande tabeller:

Ex. a) Gyttja

$Q_y$	$\frac{Q_y}{4\pi\lambda T_a}$	A	$Q_{is}$	Q	$\sqrt{\frac{k \cdot 24 \cdot 3600}{A}}$	$R_i$ för		$-T_o$ för	
						100 dygn	200	100 dygn	200
6	0.140	600	0.24	6.2	0.0044	0.044	0.062	0.25	0.41
8	0.186	85	1.7	9.7	0.012	0.12	0.17	1.10	1.34
10	0.233	30	4.7	14.7	0.020	0.20	0.28	2.20	2.56
14	0.326	7	20	34	0.041	0.41	0.58	6.88	7.73
16	0.372	3.8	37	53	0.055	0.55	0.78	11.9	13.2
18	0.419	2.4	59	77	0.070	0.70	0.99	18.6	20.5

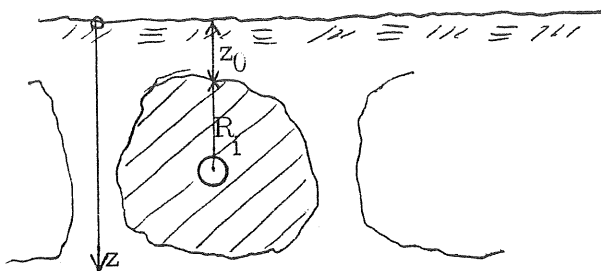
Ex. b) Lera

$Q_y$	$\frac{Q_y}{4\pi\lambda T_a}$	A	$Q_{is}$	Q	$\sqrt{\frac{k \cdot 24 \cdot 3600}{A}}$	$R_i$ för		$-T_o$ för	
						100 dygn	200	100 dygn	200
10	0.13	1000	0.18	10.2	0.0048	0.048	0.068	0.48	0.74
12	0.16	200	0.92	12.9	0.011	0.11	0.16	1.38	1.73
14	0.19	80	2.3	16.3	0.017	0.17	0.24	2.26	2.67
16	0.21	50	3.7	19.7	0.022	0.22	0.31	3.11	3.60
18	0.24	28	6.6	24.6	0.029	0.29	0.41	4.36	4.98
22	0.29	13	14.1	36.1	0.042	0.42	0.59	7.39	8.28
26	0.34	6	30.6	56.6	0.062	0.62	0.88	13.16	14.6

### 3. Smältning av is

Kylslangarna antas förlagda på sådant djup att en ofrusen zon om minst  $0,2 \cdot R_{i, \max}$  lämnas. Antag vidare att temperaturen vid sedimentytan

är konstant,  $T_b$ , under sommarhalvåret. I den frusna zonen antages temperaturen vara  $\pm 0^\circ\text{C}$ .



#### a) Vertikal värmeledning från sedimentytan

Värmeflödet från sedimentytan skall motsvara smältvärmets när isen smälter. Detta ger

$$\alpha p \cdot \frac{dz}{dt} = \lambda \cdot \frac{T_b}{z} \quad \dots \quad (17)$$

där

$$\alpha = 333 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3 \text{ och } p \text{ är porositeten.}$$

Integrering ger:

$$\int_{z_0}^{z_0 + 2R_i} z \, dz = \frac{\lambda T_b}{\alpha p} \int_0^{t_s} dt$$

$$2R_i (R_i + z_0) = \frac{\lambda T_b}{\alpha p} t_s \quad \dots \quad (18)$$

Insättes  $z_0 = 0,2 R_i$  erhålles

$$R_i = \sqrt{\frac{\lambda T_b t_s}{2,4 \alpha p}} \quad \dots \quad (19)$$

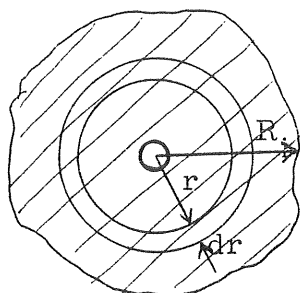
Om maximala tiden för smältning,  $t_s$ , sättes till tre månader erhålles följande värden på maximal isradie,  $R_i$ .

	$T_b = 10^\circ\text{C}$	$T_b = 20^\circ\text{C}$
Gyttja	0.24	0.33 m
Lera	0.39	0.55 m

b) Smältning genom cirkulation av uppvärmt vatten i slangen

Värmeledning från centrum i den smälta delen blir:

$$Q_s = - \lambda \cdot 2\pi r \frac{dT}{dr} \dots\dots (20)$$



Integrering ger med antagande att  $Q_s$  är konstant (kvasistationärt)

$$\ln \frac{R_{is}}{R_o} = \frac{2\pi \lambda}{Q_s} \cdot T_o \dots\dots (21)$$

Sättes  $Q_s$  lika med energibehovet vid smältning erhålles:

$$2\pi R_{is} \cdot \frac{dR_{is}}{dt} \cdot \alpha p = \frac{2\pi \lambda T_o}{\ln(R_{is}/R_o)} \dots\dots (22)$$

Denna ekv. integreras mellan gränserna  $R_o$  och  $R_i$  för att erhålla smälttiden  $t_s$ .

$$\frac{\lambda T_o}{\alpha p} \cdot \int_0^{t_s} dt = \int_{R_o}^{R_i} R_{is} \cdot \ln \left( \frac{R_{is}}{R_o} \right) dR_{is} \dots\dots (23)$$

Lösningen blir:

$$t_s = \frac{\alpha p R_o^2}{2 \lambda T_r} \left[ \left( \frac{R_i}{R_o} \right)^2 \left( \ln \frac{R_i}{R_o} - \frac{1}{2} \right) \right] \dots\dots (24)$$

Med  $t_s$  lika med tre månader blir  $R_i$  enligt följande:

$$T_o = 10^\circ\text{C}$$

$$T_o = 20^\circ\text{C}$$

Gyttja	0.34	0.46 m
Lera	0.54	0.72 m



4. Värmeupptagning med grundvattenbrunn

Vatten infiltreras genom sedimenten och tas ut genom ett punkt- eller linjeuttag på djupet D under sedimentytan. Strömningstiden från sedimentytan bör vara ca 6 månader för att få bästa årsvärmefaktor. Uttagen bör placeras så tätt att de interfererar med varandra för att inte få alltför stor spridning i strömningstiderna mellan olika strömrör: Uttagsdjupet bör överstiga 6 m för att inte värmeförluster genom ledning skall bli för stora.

a) Linjeuttag

Ett linjeuttag utföres i form av ett horisontellt, perforerat rör som nedgräves, tryckes eller på annat sätt placeras på uttagsdjupet.

Flödet till röret kan analyseras grafiskt med strömlinje-, ekvipotentiallinjenät. För ett sådant gäller:

$$F = k \cdot H \cdot \frac{m}{n} \quad \dots \quad (25)$$

där  $F$  är flödet/längdenhet av röret,  $m^3/s \cdot m$   
 $k$  är permeabiliteten,  $m/s$   
 $H$  är strömningssmotståndet,  $m$   
 $m$  är antal strömrör  
 $n$  är antal potentialfall.

Fig. 1 visar strömlinjenät för uttag på 6 m djup utan resp. med interferens från ett närliggande rör. Sedimentlagret förutsättes vara oändligt djupt.

Den energimängd som kan tas ut beror av temperatursänkningen i förångaren enl. följande:

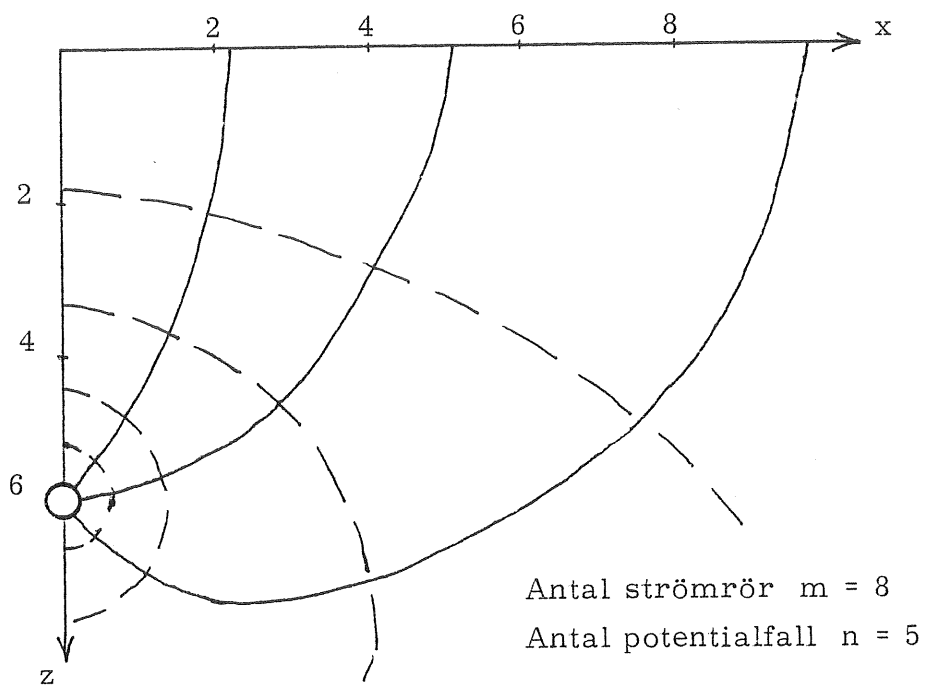
$$Q = F \cdot \Delta T \cdot \rho c \quad W/m \quad \dots \quad (26)$$

Flödet,  $F$ , ges primärt av villkoret för strömningstiden. Som en grov skattning antas "medelströmmen" följa en strömlinje som är 7 m lång. Hastigheten blir då:

$$\bar{v} = \frac{L}{T} = \frac{7}{6 \cdot 30 \cdot 24 \cdot 3600} = 4,5 \cdot 10^{-7} \quad m/s$$

Flödet blir

a)



b)

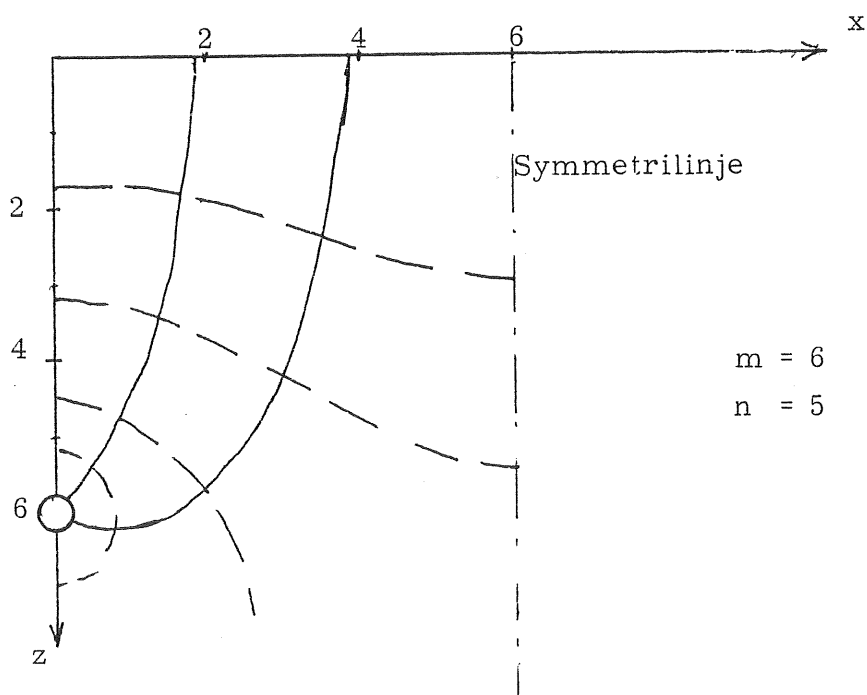


Fig. 1 Strömlinje-, ekvipotentiallinjenät för strömning till horisontell uttagsledning.

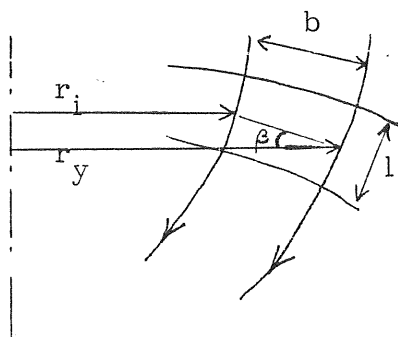
$$F = p \cdot m \cdot \bar{v} \cdot \bar{B} \quad \dots \quad (27)$$

där  $\bar{B}$  är strömrörens medelbredd. Denna kan sättas till 2 m. Porositeten,  $p$ , antas vara 35 %. Detta ger flödet  $2,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{m}$  för fall a) fig. och  $1,9 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{m}$  för fall b).

Med ett temperaturfall,  $\Delta T$ , av  $10^\circ\text{C}$  erhålles en värmeeffekt av 105 resp. 79 W/m. I praktiken torde man kunna få en högre temperatur på vattnet i fall b) genom att strömningstiden här är mera likformig än i fall a). Det temperaturfall som kan nyttiggöras blir därmed högre i fall b) vilket medför att skillnaden i värmeeffekt blir mindre än den beräknade.

#### b) Punktuttag

Detta utformas som en vanlig filterbrunn med uttag på minst 6 m djup. Flödet blir här axialsymmetriskt kring brunnsröret. Om man betraktar en ruta i strömekvipotentiallinjenätet enligt skissen gäller följande:



Över sträckan  $l$  är potentialfallet  $= H/n$ , där  $H$  är strömningssmotståndet och  $n$  antalet potentialfall. Strömningshastigheten blir  $v = kH/nl$  enligt Darcys lag.

Flödet i strömröret blir:  $v \cdot 2\pi \frac{r_y - r_i}{\cos \beta} \cdot \frac{r_y + r_i}{2} = v \cdot 2\pi b \cdot \bar{r}$ .

Insättes uttrycket för  $v$  erhålles: flödet:

$$\text{flödet} = \frac{kH}{nl} \cdot 2\pi b \cdot \bar{r} = \frac{2\pi kH}{n} \cdot \frac{b \bar{r}}{l}$$

Strömnetet skall således konstrueras så att  $\frac{b \bar{r}}{l} = \text{konstant}$ . Det totala flödet blir då

$$F = \frac{2\pi kH}{n} \cdot \sum_m \frac{b \bar{r}}{l} \quad \dots \quad (28)$$

Två exempel på strömning visas i fig. 2. I båda fallen förutsättes att uttaget sker på 6 m djup samt att ett ogenomträngligt skikt ligger på 7,5 m djup. Brunnsfiltrets radie antas vara 25 cm. Uttaget tänkes ske genom ett

nätverk av brunnar vilka ligger på avståndet 12 m från varandra i fall a) och 6 m i fall b).

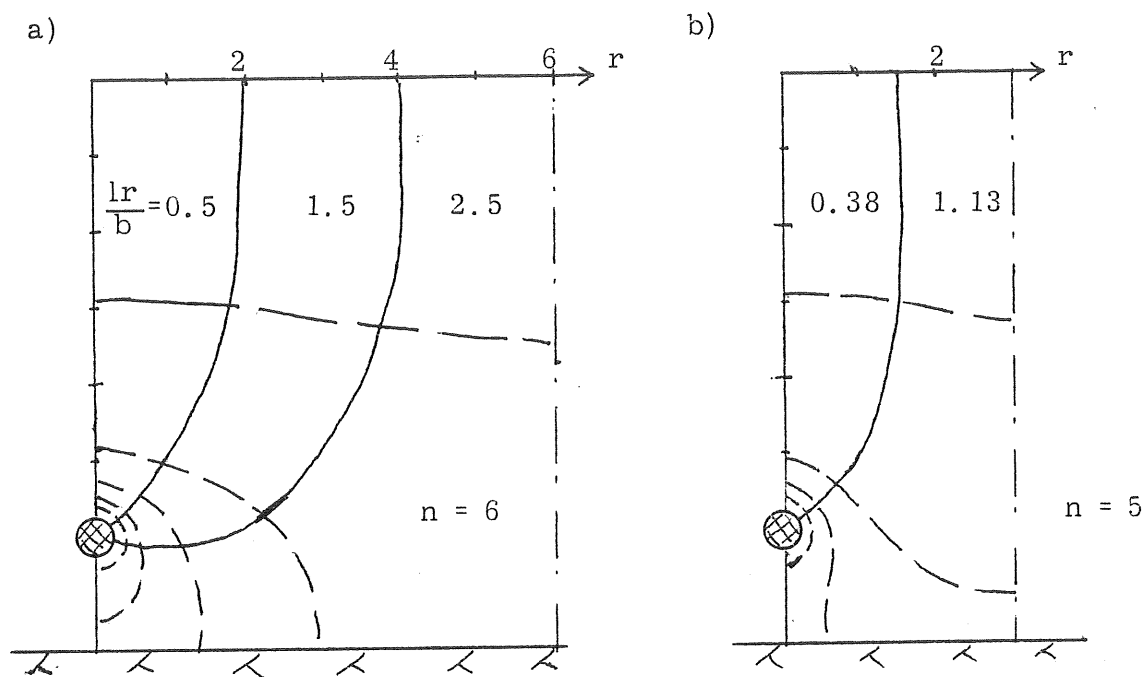


Fig.2 Strömlinje-, ekvipotentiallinjenät vid brunnsuttag

Flödet bestäms av medelhastigheten som i fall a) blir  $4,5 \cdot 10^{-7}$  m/s och i fall b) något lägre,  $4,2 \cdot 10^{-7}$  m/s. Flödet erhålles genom att multiplicera med ett medelvärde av den genomströmmande arean och porositeten, jfr. ekv. (27). Värmeflödet kan beräknas med ekv. 26. För en temperatursänkning av  $\Delta T = 10^{\circ}\text{C}$  fås följande resultat:

	v	Area	Flöde	Värmeflöde
Fall a)	$4,5 \cdot 10^{-7}$	ca 100	$1,6 \cdot 10^{-5}$	670 Watt
Fall b)	$4,2 \cdot 10^{-7}$	28	$4,1 \cdot 10^{-6}$	170 Watt

En högre vattentemperatur kan erhållas i fall b) än i a) som har en mer ojämn strömningstidsfördelning. Realistiska värden på effektupptagningen torde ligga på 200-400 Watt.

c) Strömningsförluster vid pumpning

Med detta system måste pumpning ske hela året. På sommaren "laddar" man strömningsområdet med uppvärmt vatten, 15-20 °C, vilket används i värmepumpen under vintern. Erforderlig pumpeffekt blir:

$$P = \frac{\rho g}{\eta} \cdot F \cdot H \approx 15 \cdot 10^3 F H \quad \text{Watt} \quad \dots \quad (29)$$

där verkningsgraden  $\eta$  sätts till 65 %. Strömningsmotståndet kan beräknas ur ekv. (25) resp. (28) och blir  $H = B \frac{F}{k}$ , där konstanten B bestäms av strömningsområdets geometri. Pumpeffekten blir då:

$$P \approx 15 \cdot 10^3 \cdot \frac{B F^2}{k} \quad \dots \quad (30)$$

En avgörande faktor för hela systemet är att förhållandet mellan pumpeffekt och upptagen värmeeffekt ej får bli för stor. Denna relativa pumpeffekt blir:

$$P/Q = \frac{15 \cdot 10^3 \cdot B \cdot F^2}{k \cdot F \Delta T \cdot \rho c} \quad \dots \quad (31)$$

För ett temperaturfall av 10°C erhålles:

$$\frac{P}{Q} = 3,6 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{BF}{k} \quad \dots \quad (32)$$

I tabellen nedan finns beräknat minsta erforderliga permeabilitet,  $k_{\min}$ , för att den relativa pumpeffekten skall vara mindre än 5 %.

	B	F	$k_{\min}$	jordart
Punktuttag, fall a	0,21	$1,6 \cdot 10^{-5}$	$2,4 \cdot 10^{-8}$	Mjåla, moig morän
- " - fall b	0,53	$4,1 \cdot 10^{-6}$	$1,6 \cdot 10^{-8}$	- " -
Linjeuttag, fall a	0,625	$2,5 \cdot 10^{-6}$	$1,1 \cdot 10^{-8}$	- " -
- " - fall b	0,833	$1,9 \cdot 10^{-6}$	$1,1 \cdot 10^{-8}$	- " -

Permeabiliteten begränsas emellertid även av att strömningsmotståndet, H, ej får bli högre än atmosfärstrycket genom att motståndet ligger på pumpens sugsida. I praktiken får H ej överstiga 7 m vattenpelare. Ekv. (25) och (28) ger då minsta permeabilitet till:

$$\text{Linjeuttag} \quad k_{\min} = \frac{n}{m} \cdot \frac{F}{7} \quad \dots \quad (32)$$

$$\text{Punktuttag} \quad k_{\min} = \frac{n}{2\pi \cdot \sum \frac{bF}{l}} \cdot \frac{F}{7} \quad \dots \quad (33)$$

I vårt exempel ger detta för linjeuttag en minsta permeabilitet av  $2 \cdot 10^{-7}$  m/s och för punktuttag  $3 \cdot 10^{-7}$  resp.  $5 \cdot 10^{-7}$  m/s. Detta svarar mot jordarterna finmo eller sandig morän. Begränsningen av strömningsmotståndet blir således avgörande för tillämpningen.