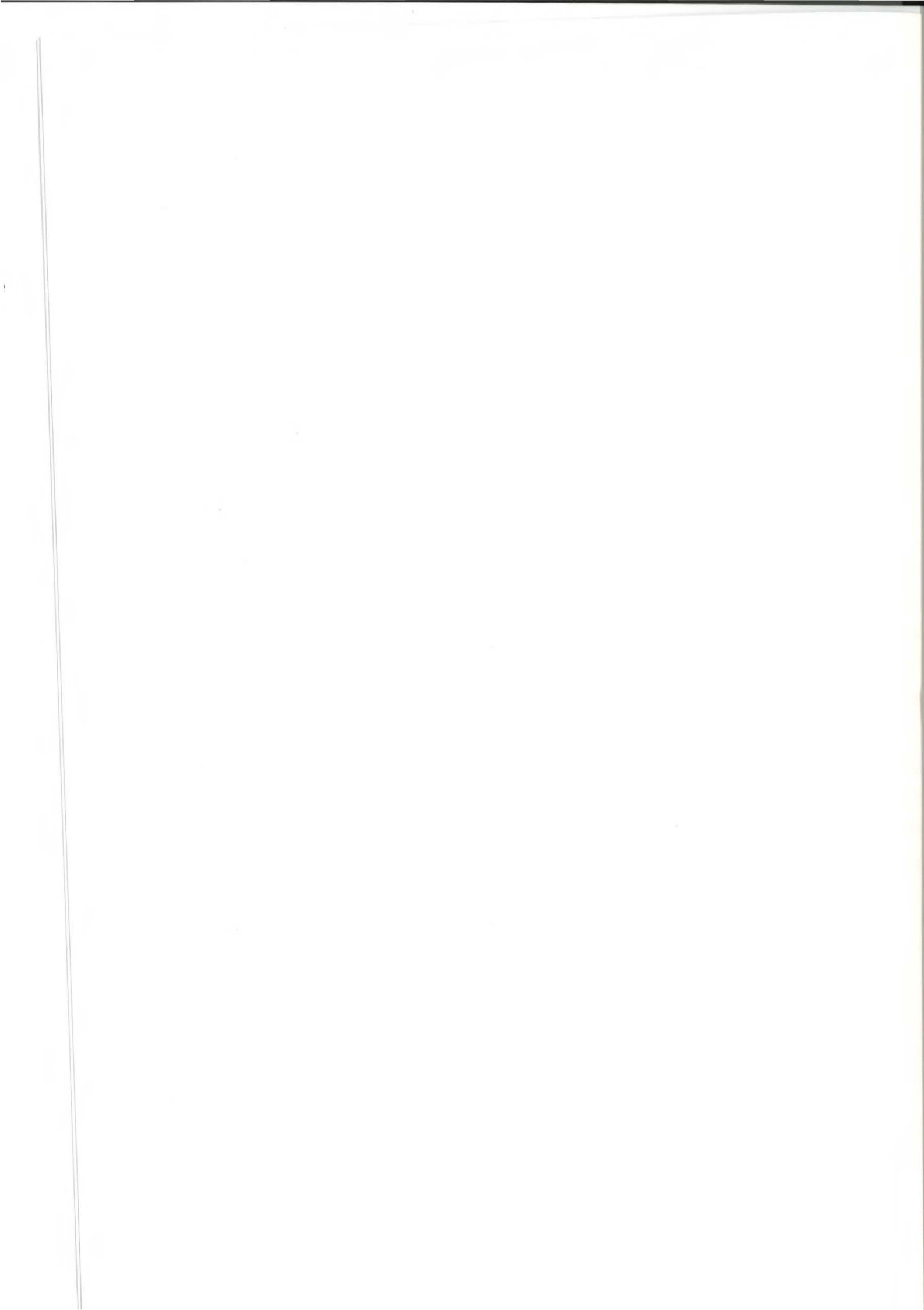




## FRYSFÖRLUSTER AV VATTEN

Todor Milanov och Jörgen Nilsson

Projektet är finansierat av Vattenregleringsföretagens  
Samarbetsorgan (VASO)



## FRYSFÖRLUSTER AV VATTEN

Todor Milanov och Jörgen Nilsson



## Förord

Detta forskningsarbete beträffande frys förluster av vatten har utförts inom projektet "Extrem tillrinning till regleringsmagasin" och har finansierats av Vattenregleringsföretagets samarbetsorgan (VASO). Jörgen Sahlberg har aktivt deltagit i arbetet och bidragit med värdefulla synpunkter på genomförandet av arbetet. Nils Sjödin, Gun Grahn och Håkan Danielsson har alla bistått vid laboratorieexperimenten. Skrivarbetet har utförts av Vera Kuylenstierna och ritarbetet av Agneta Lindblad. Ett varmt tack framförs härmed till samtliga här nämnda personer.

## INNEHÅLLSFÖRTECKNING

	<u>Sida</u>
Inledning.....	1
Härledning av ekvation för beräkning av frysför- luster av vatten.....	2
Ekvation för beräkning av förluster av vatten vid återfrysning av snösmältvatten.....	6
Totala värmeförlusten från en öppen vattenyta.....	7
Värmeflödet genom ett istäcke fritt från snö.....	8
Experimentell bestämning av frys förluster av vatten vid laboratorieförsök.....	9
Teoretisk beräkning av frys förluster av vatten.....	16
Sammanfattning.....	20
Referenser.....	21

## FRYSFÖRLUSTER AV VATTEN

### Inledning

Vid SMHI har en rad försök gjorts för att beräkna avdunstningen från snötäcke och delvis snötäckt mark. De resultat som erhållits motsvarar inte de volymfel som ibland uppträder i vårflödesprognoserna. Speciellt tycks vårar med "vackert väder" under ovanligt långa perioder ge större volymfel än andra år. En idé som av J. Nilsson och N. Sjödin (1986) testats är att vatten vid infrysning avger extra många molekyler, dvs förlorar energi, vilket leder till volymminskning. Resultaten från laboratorieexperimentet visar att processen existerar. För rent vatten uppgick viktförlusten till 2.7 %. Mätningarna har gjorts för att experimentellt visa att processen finns. I naturen bör denna process, frys förluster av vatten p g a infrysning, finnas på många ställen t ex vid en sjös isläggning, tillfrysning av mark, återfrysning av snö efter blidväder eller dagsmeja, återfrysning i och under ett snötäcke där instrålningen givit en lokal uppvärmning med följande smältning.

Syftet med detta arbete är att utifrån mer noggrant kontrollerade experiment mera exakt fastställa storleksordningen av processen samt att formulera en teoretisk beräkningsmodell för processen, så att den på sikt kan komma till användning i beräkningarna för vårflödesprognoserna. Med frys förluster av vatten menas därvid vatten förluster - avdunstning - från is under isbildningsprocessen.

Inledningsvis ges en kort översikt över de processer som bestämmer en vattenmassas avkylning. En förenklad teoretisk beräkningsmodell presenteras därefter för beräkning av frys förluster av vatten. Vidare studeras ur laborieförsök effekten av frys förlusterna av vatten och resultaten diskuteras. Slutligen beräknas avdunstnings förlusterna och därefter jämförs dess med de uppmätta värdena.

## Härledning av ekvation för beräkning av frys förluster av vatten

När en vattenmassa avkyls, avger den värme i form av långvågsstrålning, sensibel och latent värme, d v s:

$$\rho_w C_p H_w \frac{\partial T_w}{\partial t} = F_L + F_C + F_E \quad (1)$$

där

$\rho_w$  = vattnets täthet

$C_p$  = vattnets specifika värme

$H_w$  = vattendjupet (m)

$T_w$  = vattnets medeltemperatur ( $^{\circ}\text{C}$ )

$F_L$  = netto långvågsstrålning ( $\text{W m}^{-2}$ )

$F_C$  = sensibel värme ( $\text{W m}^{-2}$ )

$F_E$  = latent värme ( $\text{W m}^{-2}$ )

Den latent värmen,  $F_E$ , kan skrivas som:

$$\rho_w L_e \frac{\partial h_e}{\partial t} = F_E \quad (\text{W m}^{-2}) \quad (2)$$

där

$L_e$  = avdunstningsvärmens ( $\text{J kg}^{-1}$ )

$h_e$  = "mängd" avdunstat vatten (m)

$F_E$  beror bl a på fuktighetsgradienten ovan vattenytan, som i sin tur beror på vattentemperatur,  $T_w$ , lufttemperatur,  $T_a$ , och relativ fuktighet,  $R$ , samt vindhastighet,  $v$ . Antag att vi känner vindhastigheten ovanför vattenytan, ytvattentemperaturen, lufttemperaturen och relativa fuktigheten, då kan  $F_E$  beräknas, vilket i sin tur leder till att  $h_e$  kan beräknas från ekv. (2).



När vattenytan blir underkyld ( $\sim -0.1$  °C), påbörjas is-kristallbildningen. Efter en kort tid är hela vattenytan täckt av ett tunt islager. Antag att den värmemängd, som avgår vid iskristallbildningen, sker i form av latent värme.

$$\rho_i L_i \frac{\partial h_i^*}{\partial t} = \rho_w L_e \frac{\partial h_e^*}{\partial t} \quad (3)$$

där

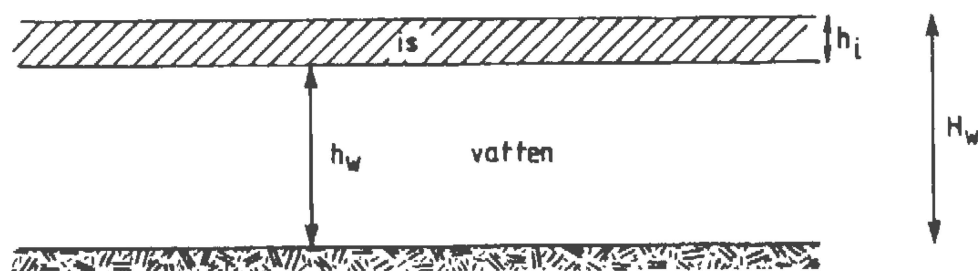
$\rho_i$  = isens täthet ( $\sim 917$  kg m<sup>-3</sup>)  
 $L_i$  = isbildningsvärme ( $\sim 3.34 \cdot 10^5$  J kg<sup>-1</sup>)  
 $h_i^*$  = iskristalltjockleken (m)

När hela ytan är istäckt, antar vi, att den fortsatta istillväxten sker på följande sätt:

$$\rho_i L_i \frac{\partial h_i}{\partial t} = \rho_w (L_e + L_i) \frac{\partial h_{ei}}{\partial t} + \alpha \quad (4)$$

där

$h_i$  = istillväxten (m)  
 $h_{ei}$  = avdunstning från is (m)  
 $\alpha$  =  $F_{Li} + F_{ci}$   
 $F_{Li}$  = nettolångvågsstrålning från is (W m<sup>-2</sup>)  
 $F_{ci}$  = sensibel värme från is (W m<sup>-2</sup>)



Masskonservering ger:

$$\rho_w h_w + \rho_i h_i + \rho_w h_{ei} = \rho_w H_w = \text{konst.} \quad (5)$$

Differentiering av (5) ger:

$$\rho_w \frac{\partial h_w}{\partial t} + \rho_i \frac{\partial h_i}{\partial t} + \rho_w \frac{\partial h_{ei}}{\partial t} = 0$$

eller

$$\frac{\partial h_i}{\partial t} = - \frac{\rho_w}{\rho_i} \left( \frac{\partial h_w}{\partial t} + \frac{\partial h_{ei}}{\partial t} \right) \quad (6)$$

Insättning av ekv. (6) i ekv. (4) ger:

$$\frac{\rho_w}{\rho_i} \left( \frac{\partial h_w}{\partial t} + \frac{\partial h_{ei}}{\partial t} \right) = - \frac{\rho_w (L_e + L_i)}{\rho_i L_i} \frac{\partial h_{ei}}{\partial t} - \frac{\alpha}{\rho_i L_i} \quad (7)$$

Genom förenkling av ekv. (7) erhålles:

$$\frac{\partial h_{ei}}{\partial t} = - \frac{L_i}{L_e + 2L_i} \frac{\partial h_w}{\partial t} - \frac{1}{\rho_w (L_e + 2L_i)} \alpha \quad (8)$$

Sammanfattningsvis kan vi säga, att förlusten, d v s avdunstningen av vatten vid isbildningen, sker i två olika faser.

$$1. \text{ Iskristallbildning: } \frac{\partial h_e^*}{\partial t} = \frac{\rho_i L_i}{\rho_w L_e} \frac{\partial h_i^*}{\partial t}$$

$$2. \text{ Fortsatt isbildning: } \frac{\partial h_{ei}}{\partial t} = - \frac{L_i}{L_e + 2L_i} \frac{\partial h_w}{\partial t} - \frac{\alpha}{\rho_w (L_e + 2L_i)}$$

Total mängd vatten, som avdunstar:

$$H_{ei} = h_e^* + h_{ei}$$

där

$$h_e^* = \frac{\rho_i L_i}{\rho_w L_e} \int_0^{h_i^*} dh_i^* = \frac{\rho_i L_i}{\rho_w L_e} h_i^* \quad (9)$$

$$\begin{aligned}
 h_{ei} &= - \frac{L_i}{L_e + 2L_i} \int_{H_w}^{h_i^*} dh_w - \frac{1}{\rho_w (L_e + 2L_i)} \int_0^t \alpha dt = \\
 &= \frac{L_i}{L_e + 2L_i} (H_w - h_i^*) - \frac{1}{\rho_w (L_e + 2L_i)} \int_0^t \alpha dt \quad (10)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 H_{ei} &= \frac{L_i}{L_e + 2L_i} H_w + \left( \frac{\rho_i L_i}{\rho_w L_e} - \frac{L_i}{L_e + 2L_i} \right) h_i^* - \\
 &- \frac{1}{\rho_w (L_e + 2L_i)} \int_0^t \alpha dt \quad (11)
 \end{aligned}$$

Försummar man här termen  $\left( \frac{\rho_i L_i}{\rho_w L_e} - \frac{L_i}{L_e + 2L_i} \right) h_i^*$

som är liten, erhålles:

$$H_{ei} = \frac{L_i}{L_e + 2L_i} H_w - \frac{1}{\rho_w (L_e + 2L_i)} \int_0^t \alpha dt \quad (12)$$

genom insättning av:

$$(L_e = 2.5 \cdot 10^6 \text{ (J kg}^{-1}\text{)} \text{ och } L_i = 3.34 \cdot 10^5 \text{ (J kg}^{-1}\text{)})$$

$$\frac{L_i}{L_e + 2L_i} = 0.1054$$

$$\frac{1}{\rho_w (L_e + 2L_i)} = 3.156 \cdot 10^{-10} \text{ (J}^{-1} \text{ m}^3\text{)}$$

$\int_0^t \alpha dt \sim \overline{(F_{L_i}(T_i) + F_{C_i}(T_i))} t$  i ekv. (12) erhålles:

$$H_{ei} = 0.1054 H_w - 3.156 \cdot 10^{-10} \overline{(F_{L_i}(T_i) + F_{C_i}(T_i))} t \text{ (m)} \quad (13)$$

där

$T_i$  = isytans medeltemperatur

$t$  = tid

$F_{L_i}(T_i)$ , långvågsstrålningen, kan uppmätas med instrument eller beräknas med Stefan Boltzmanns lag.  $F_{C_i}(T_i)$ , sensibel värme, kan beräknas med empiriska formeln.

#### Ekvation för beräkning av förluster av vatten vid återfrysning av snösmältvatten

Självfallet bör det härledda uttrycket (13) gälla även för förluster av vatten vid återfrysning av snösmältvatten. Om en dag med snösmältning följs av en kall natt, fryser det fria vattnet i snön. Frysningen av det fria vattnet i snön, som sker från snöytan neråt till ett djup,  $H_f$ , kan skattas ur lufttemperatur, snöns densitet, snöns vattenhållande förmåga per volymenhet  $m$   $m$ . Här nedan återges för skattningen av återfrysningens djup,  $H_f$ , Bengtssons formel (intresserade av härledningen hänvisas till Bengtsson, 1981).

$$H_f^2 = A (-T_a \cdot t)$$

där proportionalitetskonstanten är

$$A = \frac{\rho_s C_s K_s}{\rho L_i S}$$

där

$\rho_s$  = snöns densitet

$\rho$  = vattnets densitet

$C_s$  = snöns värmekapacitet

$K_s$  = snöns värmediffusitet ( $m^2 \cdot sec^{-1}$ )

$L_i$  = isbildningsvärme

$S$  = snöns vattenhållande förmåga per volymenhet (%)

$T_a$  = lufttemperatur ( $^{\circ}C$ )

$t$  = tid

Genom insättning av  $H_w = SH_f = S(A (-T_a \cdot t))^{1/2}$  i ekvationen (13) erhålles:

$$H_{ei} = 0.1054 S(A (-T_a \cdot t))^{1/2} - 3.156 \cdot 10^{-10} (\overline{F_{L_s}} (T_s) + \overline{F_{C_s}} (T_s)) t \text{ (m)} \quad (14)$$

där

$$F_{L_s} = \text{nettolångvågsstrålning från snö} \quad (\text{w m}^{-2})$$

$$F_{C_s} = \text{sensibel värme från snö} \quad (\text{w m}^{-2})$$

$$T_s = \text{snöytans medeltemperatur.}$$

Genom insättning av några typiska värden (Bengtsson, 1981):

$$K_s = 0.004 \text{ cm}^2/\text{sek.},$$

$$S = 0.04,$$

$$\rho_s = 0.3,$$

$$T_a = -5 \text{ }^\circ\text{C och}$$

$$t = 12 \text{ tim.}$$

finner man, att djupet för återfrysning blir 8 cm.

#### Totala värmeförlusten från en öppen vattenyta

Den totala värmeförlusten,  $F_{tot}$ , från en öppen vattenyta är lika med summan av förlusterna genom effektiv långvågsstrålning,  $F_{eff}$ , genom sensibel värme,  $F_c$ , och genom latent värme,  $F_E$ , d v s:

$$F_{tot} = F_{eff} + F_c + F_E \quad (15)$$

För dessa deltermer gäller följande formler.

Effektiv utstrålning vid klar himmel (A Ångström):

$$F_{\text{eff}} = \sigma \cdot \varepsilon \cdot T_w^4 \cdot (a + b \cdot 10^{-ce_a}) \quad (\text{w} \cdot \text{m}^{-2}) \quad (16)$$

Sensibel värme (Freysteinson, 1969):

$$F_c = 5.0 v^{0.845} (e_w - e_a) \quad (\text{w} \cdot \text{m}^{-2}) \quad (17)$$

Latent värme (Freysteinson, 1969):

$$F_c = 8.0 v^{0.845} (e_w - e_a) \quad (\text{w} \cdot \text{m}^{-2}) \quad (18)$$

där

$$\sigma = 5.75 \cdot 10^{-8} \quad (\text{w} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{°K}^{-4})$$

$$T_w = \text{vattentemperatur (°K)},$$

$$a = 0.196,$$

$$b = 0.236,$$

$$c = 0.052,$$

$$e_a = \text{ångtrycket i luften (mb)},$$

$$v = \text{vindhastighet (m/s) på 6 m höjd},$$

$$T_a = \text{lufttemperatur (°K)},$$

$$e_w = \text{maximala ångtrycket över vatten (mb)},$$

$$\varepsilon = \text{emissionsförmåga (\%)}.$$

I "Klimatdata för Sverige" (R. Taesler, 1972) anges emissionsförmågan,  $\varepsilon$ , för vatten vara 92 - 96 %, för is 96 %, för nyfallen snö 82 - 99.5 % och för gammal snö 89 %. Vatten, is och snö strålar ut värme med hög intensitet.

#### Värmeflödet genom ett istäcke fritt från snö

Sedan ett istäcke lagt sig, sker värmeförlusten från en vattenyta inte längre direkt till atmosfären utan förmedlas genom ett värmeisolerande skikt.

Vid skattningar av totala värmeförlusten från isen,  $F_{\text{tot}}(T_{\text{is}})$ , kan samma formler användas för en nollgradig vattenyta, d v s formlerna (16 - 18), men med den väsentliga skillnaden, att temperatur - och fuktighetsdifferenserna blir lägre,  $(T_{\text{is}} - T_{\text{a}}) \leq (T_{\text{w}} - T_{\text{a}})$  och  $(e_{\text{is}} - e_{\text{a}}) \leq (e_{\text{w}} - e_{\text{a}})$ . För att göra skattningarna av  $F_{\text{tot}}(\text{is})$  fordras, att man känner temperaturen på isytan,  $T_{\text{is}}$ .

Eftersom isen har temperaturen  $0^{\circ}\text{C}$  på sin undersida och  $T_{\text{is}}$   $^{\circ}\text{C}$  på sin översida, är värmeförlusten genom isen enligt värmeledningsformeln:

$$\lambda \frac{(-T_{\text{is}})}{H_{\text{is}}}$$

Man får då sambandet:

$$F_{\text{tot}}(T_{\text{is}}) = c F_{\text{tot}}(T_{\text{w}}) = \lambda \frac{(-T_{\text{is}})}{H_{\text{i}}} \quad (19)$$

där

$$\lambda = 2.24 \text{ w/m} \cdot ^{\circ}\text{C},$$

$$c = 1 \text{ för } H_{\text{i}} \leq 1 \text{ cm}.$$

Då kan  $T_{\text{is}}$  beräknas.

#### Experimentell bestämning av frysförluster av vatten vid laboratorieförsök

För att testa om avdunstningen spelar någon väsentlig roll vid energibortföring vid infrysning genomförde J. Nilsson och N. Sjödin (1986) några enklare laboratorieexperiment. Av dessa experiment framgår, att vid infrysningen av rent vatten erhöles en vattenförlust - avdunstning - på 2.7 %. Mätningarna har gjorts för att experimentellt visa, att effekten finns. Man kan dock inte göra några exakta beräkningar utifrån dessa experiment.

För att verifiera resultaten i HOH PM nr 67 samt kontrollera den ovan härledda teoretiska ekvationen genomförde man ett antal nya, noggrannare kontrollerade infrysningar av vatten. Dessa redovisas nedan och därefter diskuteras resultaten.

En balja med arean  $613 \text{ cm}^2$  anskaffades. Baljan fylldes med kylt vatten till en bestämd nivå. Vattentemperaturen mättes och noterades. Därefter värmeisolerades baljans sidor och botten med frigolit och den ställdes in i frysrummet på en elektronisk våg med fjärravläsning. Vikten avlästes sedan med olika tidsintervall, tätare precis då isbildning startade.

Under försökets gång mättes den infallande långvågsstrålningen mot provytan och ett medelvärde togs. Lufttemperaturen och relativa fuktigheten registrerades med termohydrograf. Vinden, som genererats av frysrummets fläktar, mättes med en vindmätare, dock mycket approximativt.

#### Försök 1

Vattennivå 5 cm, vattentemperatur före försöket  $6.6 \text{ }^\circ\text{C}$ , vindhastighet vid baljan ungefär  $0.5 \text{ m/s}$ , arean på baljan vid provytan  $613 \text{ cm}^2$  och uppmätta infallande långvågsstrålningen mot provytan  $246 \text{ w} \cdot \text{m}^{-2}$ .

#### Försök 2

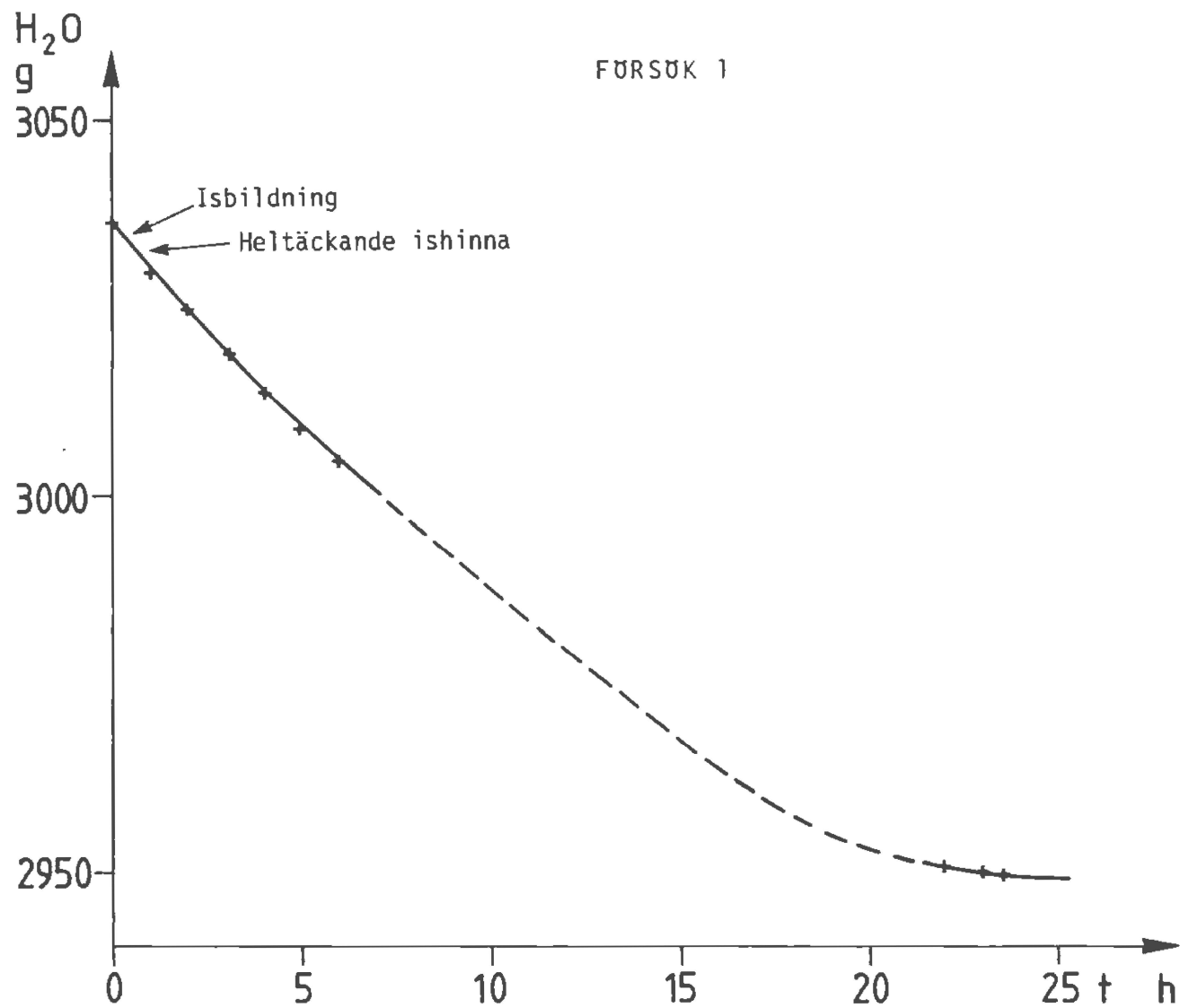
Vattennivå 5 cm, vattentemperatur före försöket  $7.0 \text{ }^\circ\text{C}$ , vindhastigheten vid baljan ungefär  $0.5 \text{ m/s}$ , arean på baljan vid provytan  $613 \text{ cm}^2$  och uppmätta infallande långvågsstrålningen  $246 \text{ w} \cdot \text{m}^{-2}$ .

#### Försök 3

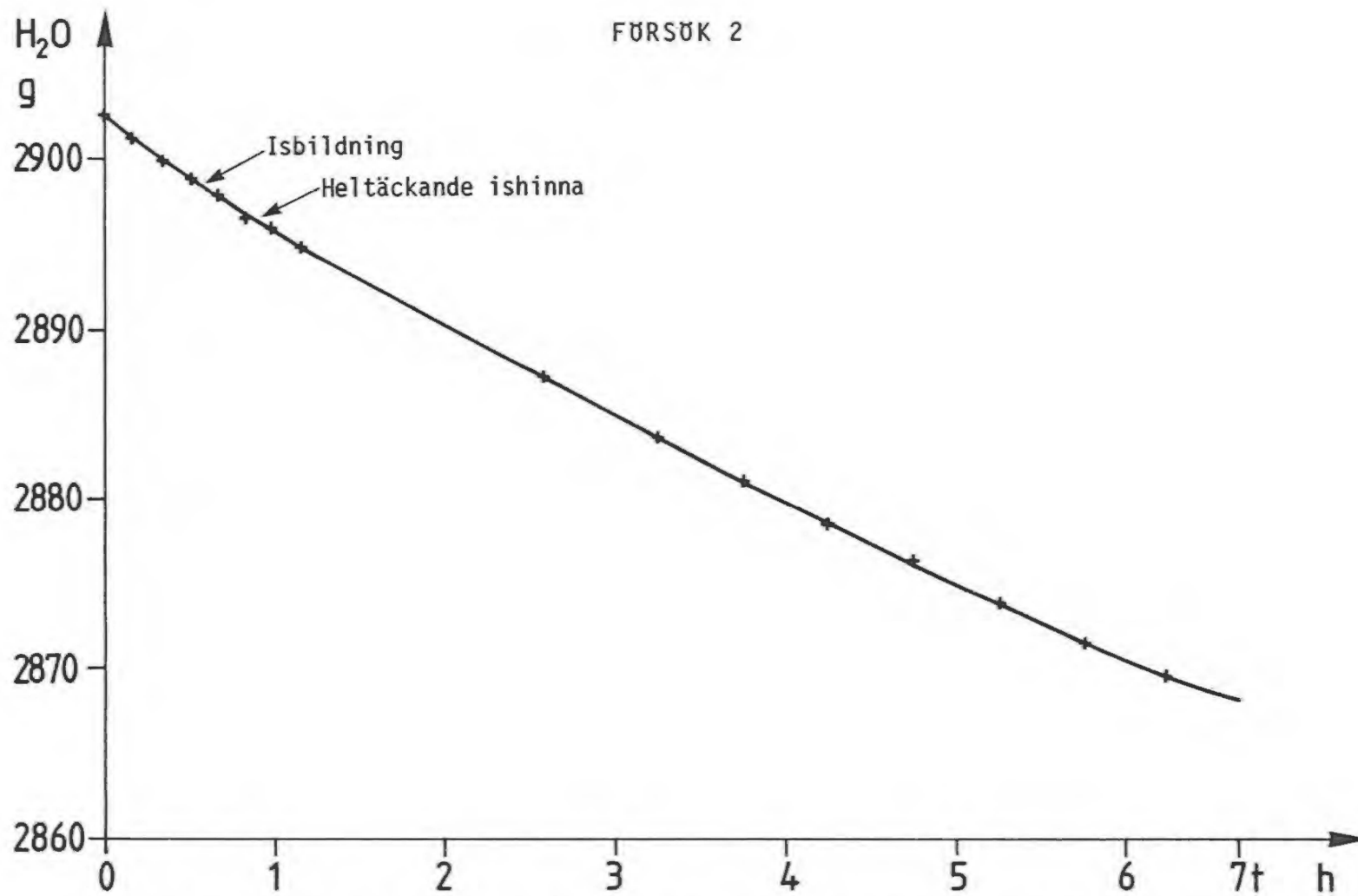
Vattennivå 2.5 cm, vattentemperatur  $7.2 \text{ }^\circ\text{C}$ , vindhastighet ungefär  $0.5 \text{ m/s}$ , arean på baljan vid provytan  $541 \text{ cm}^2$  och uppmätta infallande långvågsstrålningen  $246 \text{ w} \cdot \text{m}^{-2}$ .

Vid de tre försöken var lufttemperaturen i frysrummet i medeltal  $-15 \text{ }^\circ\text{C}$  och relativa fuktigheten mellan 70 och 80 %. Förutom instrumentens fel i mätningarna är viktvärdena behäftade med avläsningsfel. Avläsningsfelet beror på fläktar-



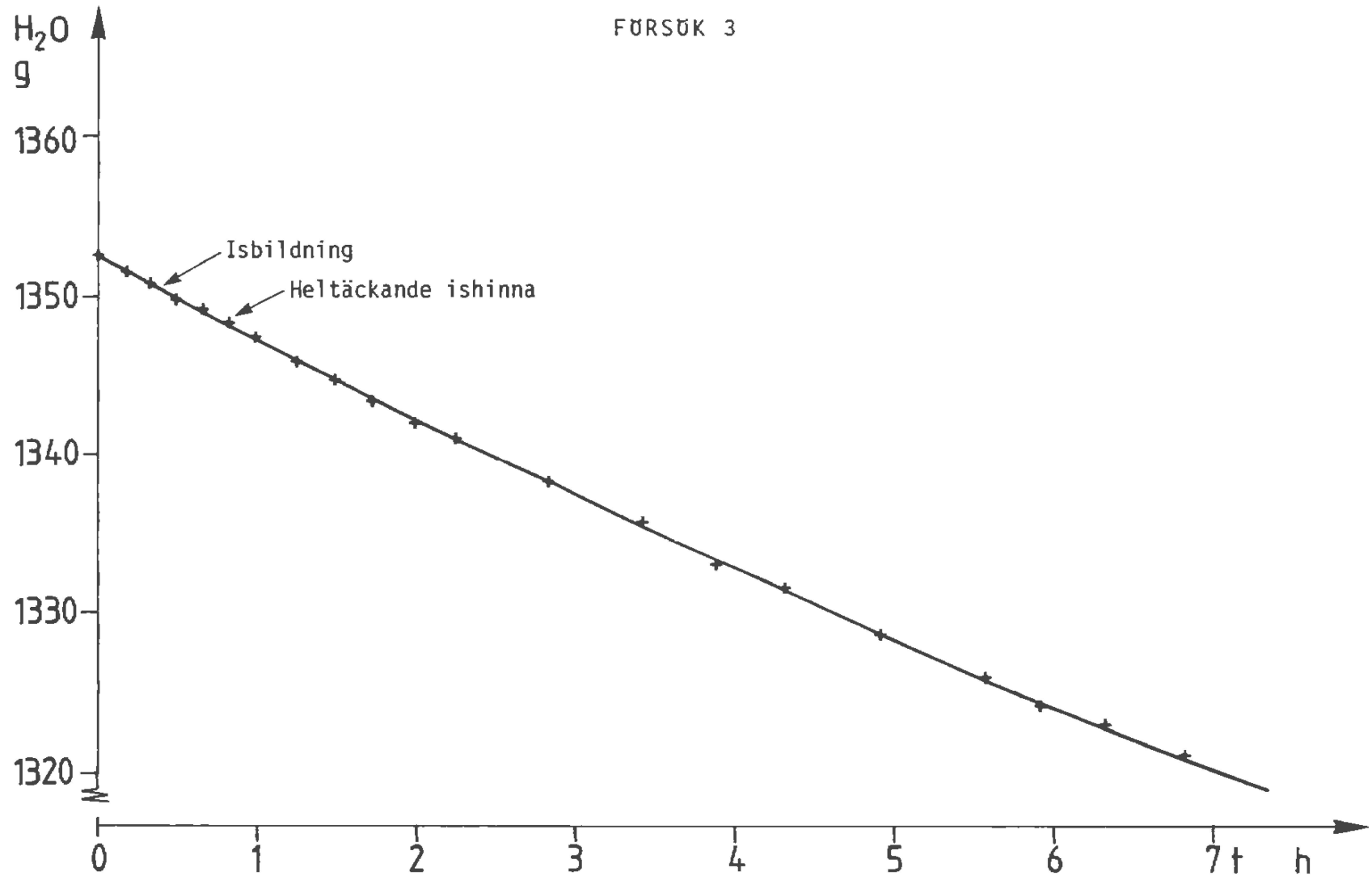


Figur 1. H<sub>2</sub>O-vikt i gram plottad mot frystiden t vid lufttemperatur -15°C och relativ fuktighet 70 - 80 %.

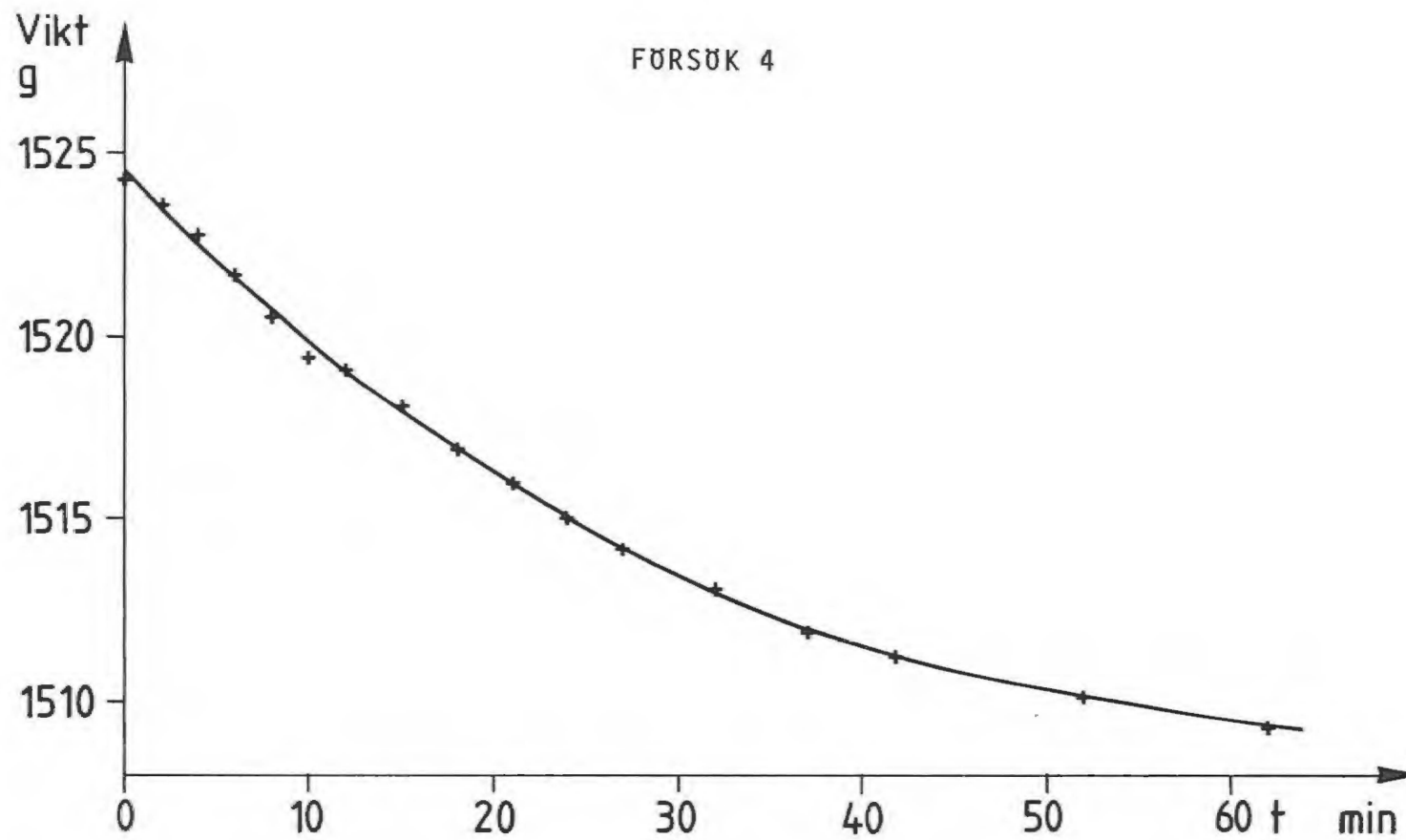


Figur 2.  $H_2O$ -vikt i gram plottad mot frystiden  $t$  vid lufttemperatur  $-15^{\circ}C$  och relativ fuktighet 70 - 80 %

FÖRSÖK 3



Figur 3. H<sub>2</sub>O-vikt i gram plottad mot frystiden t vid lufttemperatur -15°C och relativ fuktighet 70 - 80 %



Figur 4. Våtskurtrasans vikt i gram plottad mot tiden t vid lufttemperatur  $-15^{\circ}\text{C}$  och relativ fuktighet 70 - 80 %

Tabell 1. Avdunstningen  $H_{ei}$  i mm och %, beräknad för två olika tidsperioder under laboratorie-försöken.

Försök nr	Vatten- djup $H_w$ cm	Provyt. areal, $A \text{ cm}^2$	Vattnets vikt vid start g	Frystid		Vattnets vikt efter t h	Vikt- förlust g	Avdunst- ning $H_{ei}$ mm	$H_{ei}/H_w$ %
				t	h				
1	5	613	3036.4	15.50		2954.0	82.4	1.30	2.7
1	5	613	3036.4	23.50		2950.3	86.1	1.40	2.8
2	5	613	3393.2	6.25		3360.3	32.9	0.54	1.1
2	5	613	3393.2	73.75		3292.0	101.2	1.65	3.3
3	2.5	541	1352.6	7.00		1321.0	31.6	0.58	2.3
3	2.5	541	1352.6	22.00		1308.6	44.0	0.81	3.2

nas inverkan på vågen. Felet bedöms vara  $\pm 0.5$  gram och maxfelet 1 gram.

I figur 1 - 4 redovisas avlästa vattenvärden plottade mot infrysningstiden. Diagrammet utgör en experimentell bekräftelse på att viktförlusterna - avdunstningen - är intensivast under isbildningsprocessen, d v s under den tid, som kristallisationen och istillväxten pågår. Därefter avtar avdunstningen mycket snabbt och kan därför för kortare tidsperioder sättas approximativt lika med noll. I tabell 1 återges värden på avdunstningen  $H_{ei}$  i mm och %, beräknade ur uppmätta data för två olika tidsperioder, d v s dels för den tidsperiod, då isbildningen pågår, och dels för hela den tidsperiod, då försöket har pågått.

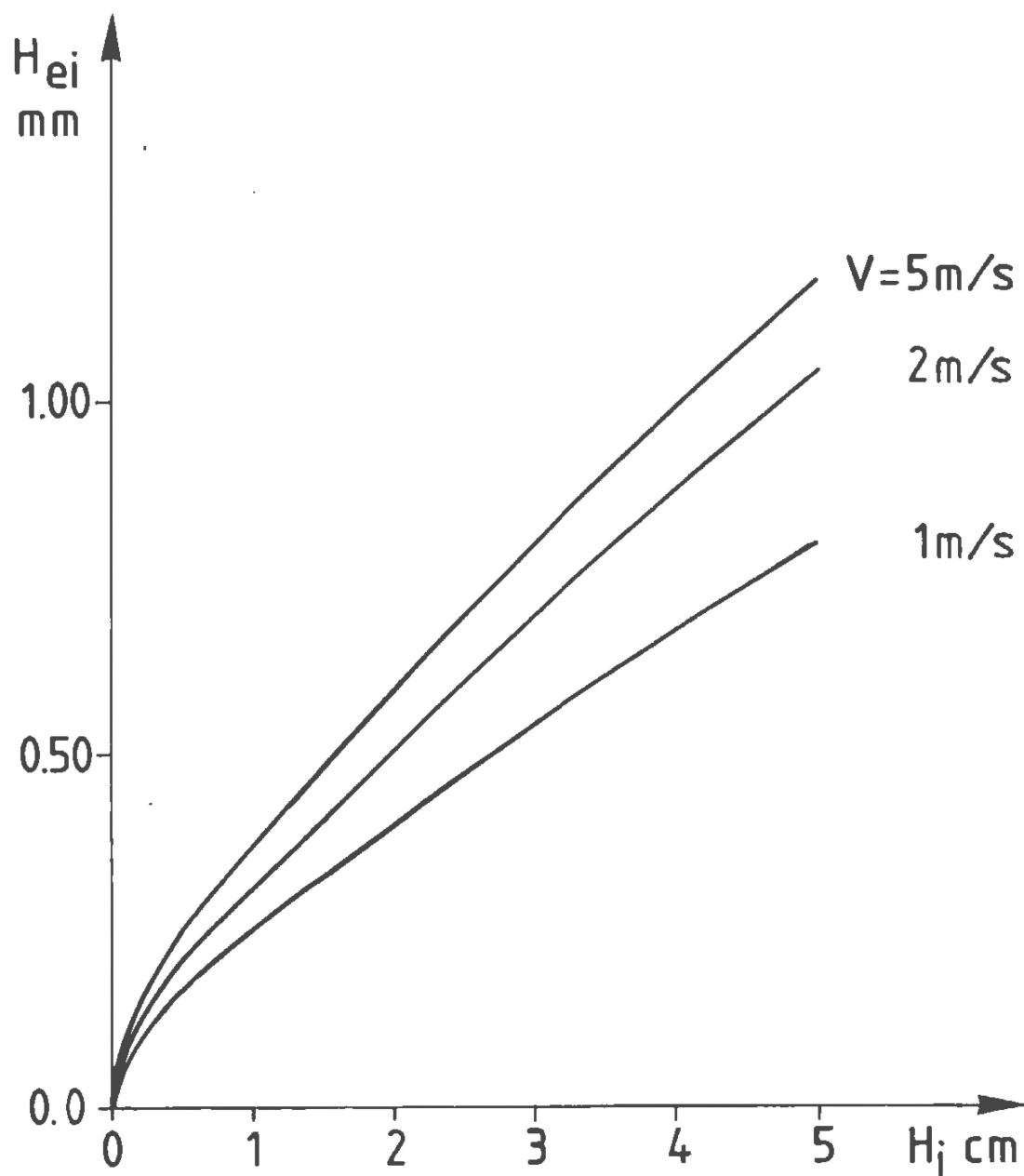
För att ytterligare belysa avdunstningsförlusterna vid frysningsprocessen genomfördes även försök med infrysning av våt skurtrasa.

#### Försök 4

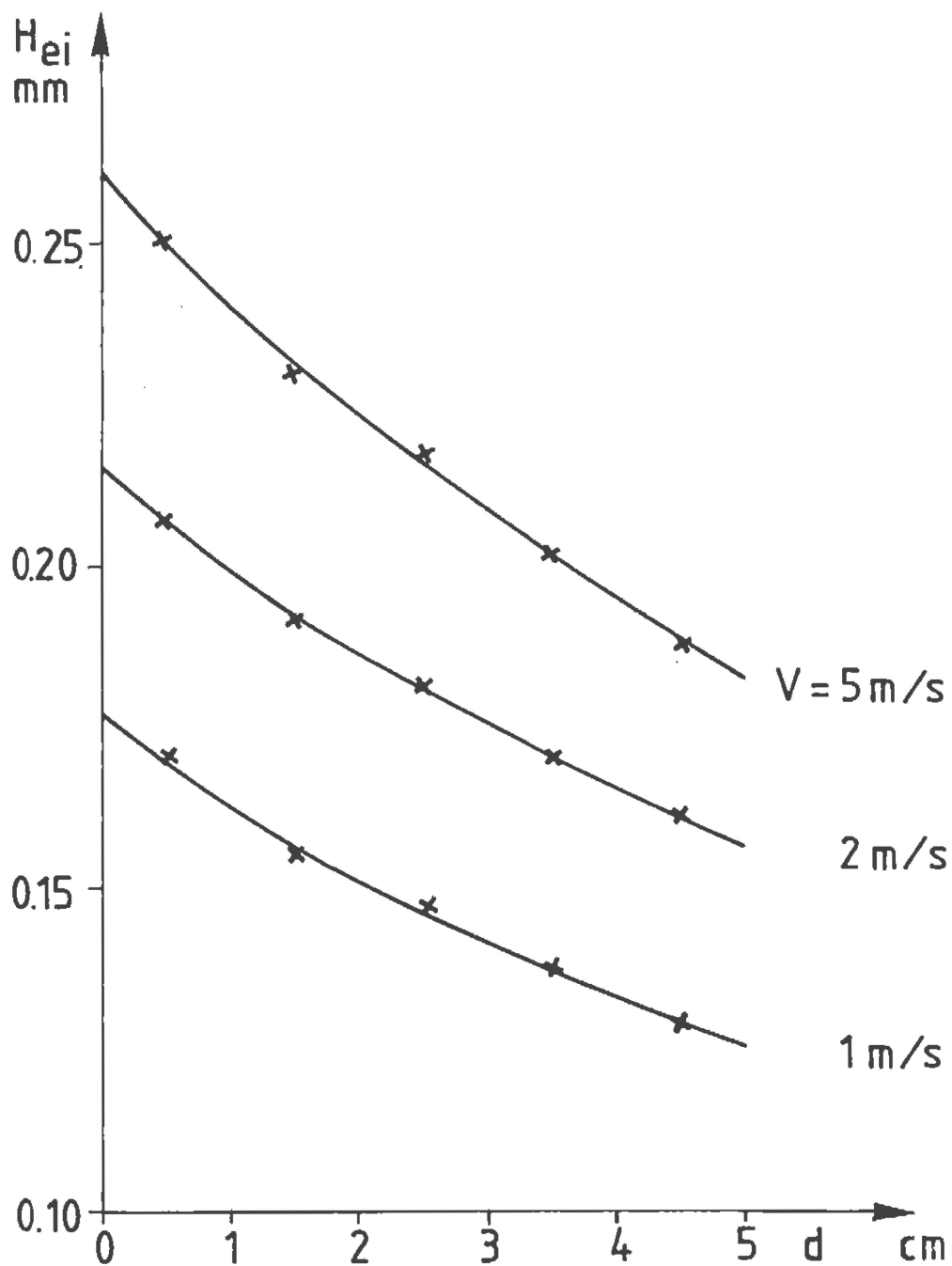
Torr skurtrasa med utrustning vägde 991 g vid försökets start. Vattnet i skurtrasan vägde 533.2 g. Vid detta prov konstaterades en vattenförlust på 2.8 % (14.9 g). Fördelen med detta experiment är att det kan utföras på kort tid, ca 1 timme.

#### Teoretisk beräkning av frysförluster av vatten

Med ekv. (13) och (16 - 19) har avdunstningsförluster beräknats från is under istillväxten vid vindhastigheterna 1, 2 och 5 m/s, lufttemperaturen  $-15^{\circ}\text{C}$ , relativa fuktigheten, 100 %, och vid molnfri himmel. En sammanfattning av resultaten redovisas i figurerna 5 - 7. Som synes, ökar avdunstningen kraftigt med vindhastigheten och minskar snabbt med istillväxten vid olika istjocklek, se figur 6.

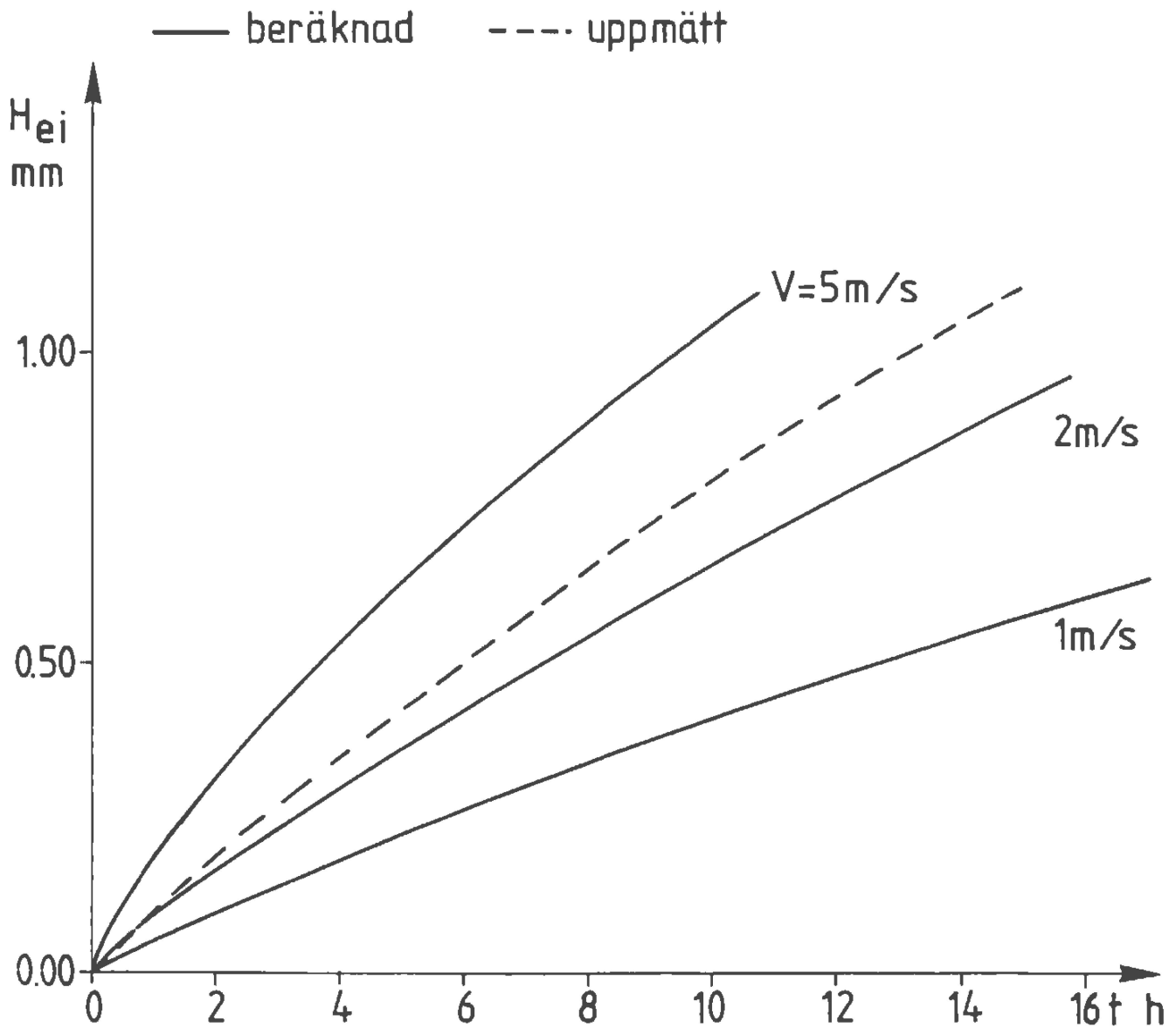


Figur 5. Frys förluster - avdunstning  $H_{ei}$  plottad mot istillväxten  $H_i$  vid tre olika vindhastigheter, lufttemperatur  $-15^{\circ}\text{C}$  och relativ fuktighet 100%.



Figur 6. Frys förluster - avdunstning  $H_{ei}$  i mm per 1 cm istillväxt vid olika istjocklek, vindhastigheter 1, 2, 5 m/s, lufttemperatur  $-150^{\circ}\text{C}$  och relativ fuktighet 100%.





Figur 7. Frysförsluster - avdunstning  $H_{ei}$  plottad mot frystiden  $t$  vid olika vindhastigheter, lufttemperatur  $-15^{\circ}$  och relativ fuktighet 100%.

Som jämförelse återges i figur 7 avdunstningsvärden från infrysning av rent vatten, uppmätta på laboratorium. Man kan således konstatera, att de uppmätta avdunstningsförlusterna ligger inom intervallen för de teoretiskt beräknade. De uppmätta värdena är av ungefär samma storleksordning som de beräknade vid en vindhastighet på ca 3 m/s. Diagrammet utgör alltså experimentell bekräftelse på att de med ekv. 13 beräknade värdena är rimliga.

### Sammanfattning

När en vattenmassa avkyls, avger den värme i form av långvågsstrålning, sensibel och latent värme (ekv. 1). Då vattenytan blir underkyld ( $\sim -0.1$  °C), påbörjas iskristallbildningen. Efter en kort tid är hela vattenytan täckt av ett tunt islager. Vid fasomvandlingen från vatten till is frigöres isbildningsvärme ( $3.34 \cdot 10^5$  J kg<sup>-1</sup>). Denna energi liksom värmeförluster från vattenytan under istäcket, som förmedlas genom isen enligt värmeledningsformeln (19), lämnar isytan genom utstrålning, sensibel och latent värme. Dessa deltermer har beräknats med ekv. (16 - 18). Vid skattningen av dessa värmeförluster finner man, att största värmeförlusterna under isbildningsprocessen (80 - 85 %) har skett genom utstrålning och sensibel värme och resten (15 - 20 %) genom avdunstning.

För att testa om avdunstningen spelar någon väsentlig roll vid energibortföringen och kontrollera den härledda teoretiska ekvationen (13) genomförde man vid SMHI några laboratorieexperiment med infrysningar av vatten. En sammanfattning av resultaten redovisas i figurerna 1 - 4 och tabell 1. Diagrammet utgör en experimentell bekräftelse på att avdunstningen är intensivast under isbildningsprocessen. Därefter avtar avdunstningen mycket snabbt. Vid dessa försök konstaterades vattenförluster på ca 3 %.

Med den teoretiskt härledda ekvationen (13) har avdunstningsförluster beräknats och därefter jämförts med de på laboratorium uppmätta värdena (figur 7). Man kan således konstatera, att de uppmätta avdunstningsförlusterna ligger inom intervallen för de teoretiskt beräknade. Diagrammet utgör alltså en experimentell bekräftelse på att de med ekv. (13) beräknade värdena är rimliga.

### Referenser

- Ager, B., och Samuelsson, B. (1958)  
Isens egenskaper och preparering av is för virkesavläggning.  
Norrlands Skogsvårdsförbunds Tidskrift 1958:4
- Bengtsson, L. (1981)  
Snowmelt generated run-off from small areas as a daily transient process.  
Högskolan i Luleå, Vattenbyggnad, Serie A 51
- Bengtsson, L. (1981)  
Snösmältning i urbana och rurala områden i Luleå 1980.  
Högskolan i Luleå, Vattenbyggnad, Serie A, nr 66
- Fremling, S. (1977)  
Sjöisars beroende av väder och vind, snö och vatten.  
SMHI, Rapport nr RHO 12, Norrköping
- Freysteinson, S. (1969)  
Water temperature and heat balance of rivers - Jökull 18.  
Ar, Reykjavik
- Liljequist, G. (1970)  
Klimatologi.  
Uppsala Universitet, Meteorologiska Institutionen, Uppsala
- Nilsson, J. och Sjödin, N. (1986)  
Frysförluster av vatten.  
SMHI, HOH PM nr 67, Norrköping
- Taesler, R. (1972)  
Klimatdata för Sverige.  
Byggeforskningen, Svensk Byggtjänst, Stockholm

Mr	Titel	
1	Hydrologiska undersökningar i Kasejåns representativa område Meddelande nr III: Vattenomsättningen i Lilla Tivsjöns område 1966/67 - 1972/73 av A Waldenström Stockholm 1974	26
2	Hydrologiska undersökningar i Lappråkets representativa område Meddelande nr IV: Nederbörd och vattenomsättning av M Persson Stockholm 1974	27
3	Oceanografiska observationer i Östersjön 1973 med kustbevakningens båtar samt från isbrytare av U Ehlin och B Juhlin Stockholm 1974	28
4	Oceanografiska undersökningar i Ålands hav Meddelande nr I: Mätningar juni - september 1973 av U Ehlin och C Ambjörn Stockholm 1974	29
5	SMHI-rapport Verification of heated water jet numerical model by James G Weil Stockholm 1974	30
6	Hydrologiska undersökningar i Lappråkets representativa område Meddelande nr V: Markvattenstudier av T Milanov Stockholm 1975	31
7	Hydrologiska undersökningar i Lappråkets representativa område Meddelande nr VI: Vattenomsättningen 1968-73 med feluppskattning av M Persson Stockholm 1975	32
8	Hydrologiska undersökningar i Kasejåns representativa område Meddelande nr IV: Snötaxering 1974 och vattenomsättning 1969-73 av A Waldenström Stockholm 1975	33
9	Sädesmätningen i en punkt som funktion av meteorologiska data av B Jönsson Stockholm 1975	34
10	Oceanografiska undersökningar i Ålands hav Meddelande nr 2: Mätningar okt-dec 1973 och juli - sept 1974 av U Ehlin och C Ambjörn Stockholm 1975	35
11	Oceanografiska observationer i Östersjön 1974 med kustbevakningens båtar samt från isbrytare av U Ehlin och B Juhlin Stockholm 1975	36
12	Vattenomsättning och flöde i Stormyra-området av L Liljequist och L Sterner Stockholm 1975	37
13	Hydrologiska undersökningar i Lappråkets representativa område Meddelande nr VII: Avrinningen och dess variationer inom området av M Persson Norrköping 1976	38
14	Vattenomsättningsstudier m m i Velens och Kasejåns representativa områden av A Waldenström Norrköping 1976	39
15	Strömmätningar i sundet mellan Värmlandsjön och Dalbosjön, Väneren Vänerundersökningen. Meddelande nr 1 av B Carlsson och M Brandt Norrköping 1976	40
16	Oceanografiska observationer i Östersjön 1975 med kustbevakningens båtar samt från isbrytare av U Ehlin och B Juhlin Norrköping 1976	41
17	Oceanografiska undersökningar i Ålands hav 1975 Meddelande nr 3: Mätningar 1974-75. Vattentransporter av U Ehlin och C Ambjörn Norrköping 1976	42
18	Tillämpning av HBV-2 modeller på regleringsmagasin i Ångermanälven av S Bergström och B Jönsson Norrköping 1976	43
19	Grundvattenståndsmätningar i Ångermanälvens övre tillrinningsområde av T Milanov Norrköping 1976	44
20	Beräkning av frekvenser av torrår av L Gottschalk Norrköping 1976	45
21	Hydrografi och sandaughning av M Brandt Norrköping 1976	46
22	Hydrologiska undersökningar i Lappråkets representativa område Meddelande nr VIII: Vattenomsättning och avdunstning under perioden 1968-76 av M Persson Norrköping 1976	47
23	Oceanografiska observationer i Östersjön 1976 med kustbevakningens båtar av U Ehlin och B Juhlin Norrköping 1977	48
24	Oceanografiska undersökningar i Ålands hav Meddelande nr 4: Mätningar 1975-76, vatten- och materialtransportberäkningar av U Ehlin och C Ambjörn Norrköping 1977	49
25	Ström- och vattentransportstudier i norra Öresund, sydöstra Kattegatt och i Skälderiviken av M Brandt Norrköping 1977	50
		51
		52
		53
		54
		55
		56
		57
		58
		59
		60
		61
		62
		63
		64
		65
		66
		67
		68
		69
		70
		71
		72
		73
		74
		75
		76
		77
		78
		79
		80
		81
		82
		83
		84
		85
		86
		87
		88
		89
		90
		91
		92
		93
		94
		95
		96
		97
		98
		99
		100

## HO-RAPPORTER

- 1 Metod för homogenitetskontroll av meteorologiska och hydrologiska observationsserier av Sven-Erik Westman Norrköping 1982
- 2 Utvärdering och modellsimulering av grundvatten-mätningarna i Ångermanälvens Övre tillrinningsområde av O Sandberg Norrköping 1982
- 3 Oceanografiska observationer runt svenska kusten med kustbevakningens båtar 1982 av B Juhlin Norrköping 1983
- 4 Utvärdering av 1982 års värfloödesprognoser av M Högström och M Persson Norrköping 1983
- 5 Vågdata från svenska kustvatten 1982 av Jonny Svensson Norrköping 1983
- 6 The new harbour in Landskrona - oceanographic investigations by Jonny Svensson Norrköping 1983
- 7 Operational hydrological forecasting in Sweden by Magnus Persson Norrköping 1983
- 8 Vattenutbyte mellan Bottniska Viken och Östersjön av Cecilia Ambjörn Norrköping 1983
- 9 Var vintern 1982/83 extrem? En jämförande studie av vattentemperatur i några mellanevenska sjöar av Gun Zachrisson Norrköping 1983
- 10 Sedimenttransport i svenska vattendrag 1981. Resultat från sedimenttransportnätet av Maja Brandt Norrköping 1983
- 11 Försök med automatisk vattenprovtagning i Marviken av Bo Juhlin Norrköping 1983
- 12 Värmehet ur Hälgasjön - Möjligheter och konsekvenser av Gun Zachrisson och Barry Brown Norrköping 1984
- 13 Oceanografiska observationer runt svenska kusten med kustbevakningens fartyg 1983 av Bo Juhlin Norrköping 1984
- 14 Åtgärder mot förorening i Velan. Erfarenheter från utförd behandling med kalk och soda samt förslag till fortsatta åtgärder. En utredning för Töreboda kommun av Ingemar Holmström Norrköping 1984
- 15 Vågdata från svenska kustvatten 1983 av Jonny Svensson Norrköping 1984
- 16 Beräkning av daglig vattenföring vid Ulva kvarn i Fyrisån 1951-82 av Magnus Persson och Sven-Erik Westman Norrköping 1984
- 17 Utvärdering av 1983 års värfloödesprognoser av Martin Högström och Magnus Persson Norrköping 1984
- 18 Vattenståndprognoser för Hammarsjön - Helge Å. En utredning för Kristianstad län av Barbro Johansson
- 19 Utvärdering av 1984 års värfloödesprognoser av Martin Högström Norrköping 1984
- 20 Svenskt Sjöregister - Uppdatering av Torbjörn Lindkvist och Christina Thom-Hjärpe Norrköping 1984
- 21 Snömätning med flygburen gammapektrometer i Kultsjöns avrinningsområde 1980 - 1984 av Sten Bergerström och Maja Brandt
- 22 PROBE - An Instruction Manual by Urban Svensson Norrköping 1984
- 23 Kartläggning av ytvattentemperaturen med satellitdata av Thomas Thompson Norrköping 1985
- 24 Oceanografiska observationer runt svenska kusten med kustbevakningens fartyg av Bo Juhlin Norrköping 1985
- 25 Vindföruster vid mätning av anönerbörd med SMHI-nederbördsmätaren av Bengt Carlsson Norrköping 1985
- 26 Svenskt Vattendragsregister av Torbjörn Lindkvist Norrköping 1985
- 27 Svenskt Sjöregister av Kurt Ehlert (projektledare) Norrköping 1985
- 28 Aplicación del modelo HBV a la cuenca del Lago de Arenal en Costa Rica av Barbro Johansson, Magnus Persson, Göran Sandberg och Edgar Robles (ICE) Norrköping 1985
- 29 Beräknat markvattenunderskott i Simlångens avrinningsområde 1934-83 av Gun Grahn, Barbro Johansson och Barbro Norlander Norrköping 1985
- 30 Beräknat markvattenunderskott i Emåns avrinningsområde 1934-83 av Gun Grahn, Barbro Johansson och Barbro Norlander Norrköping 1985
- 31 Application of the HBV-model to pilot basins in Burma av Ohn Oyaw och Magnus Persson Norrköping 1985
- 32 Vattenbalanskartor över Sverige - månadsmedelvärden för 1931 - 1960 av nederbörd, avdunstning och avrinning av Todor Milanov Norrköping 1985
- 33 Vågdata från svenska kustvatten 1984 av Jonny Svensson Norrköping 1985

Nr	Titel	Nr	Titel
	HYDROLOGISKA RAPPORTER		OCEANOGRAFISKA RAPPORTER
1	Hydrokemiska data från de svenska fältforskningsområdena av Bengt Carlsson Norrköping 1985	1	En hydrodynamisk modell för spridnings- och cirkulationsberäkningar i Östersjön - Slutrapport av Lennart Funkquist Norrköping 1985
2	Utvärdering av 1985 års vårflödesprognoser av Martin Häggström och Magnus Persson Norrköping 1986	2	Spridningsundersökningar i yttre fjärden Piteå av Barry Broman och Carsten Pettersson Norrköping 1985
3	Riktlinjer och praxis vid dimensionering av utskov och dammar i USA. Rapport från en studieresa i oktober 1985 av Sten Bergström, Ulf Ehlin, SMHI, och Per-Eric Ohlsson, VASO Norrköping 1986	3	Utbyggnad vid Malmö hamn; effekter för Lomlabaktens vattenutbyte av Cecilia Ambjörn Norrköping 1986
4	Skåneprojektet - Hydrologisk och Oceanografisk information för vattenplanering - ett pilotprojekt av Barbro Johansson, Erlend Bergstrand och Torbjörn Jutman Norrköping 1986	4	SMHI:s undersökningar i Öregrundsgrepen perioden 84/85 av Jan Andersson och Robert Hillgren Norrköping 1986
5	Översiktlig sammanställning av den geografiska fördelningen av skador främst på dammar i samband med septemberflödet 1985 av Martin Häggström Norrköping 1986	5	Oceanografiska observationer utmed svenska kusten med kustbevakningens fartyg 1985 av Bo Juhlin Norrköping 1986
6	Vattenföringsberäkningar i Södermanlands län - ett försöksprojekt av Barbro Johansson Norrköping 1986	6	Uppföljning av sjövärmepump i Lilla Värtan av Barry Broman Norrköping 1986
7	Areella snöstudier av Maja Brandt Norrköping 1986	7	15 års mätningar längs svenska kusten med kustbevakningen (1970 - 1985) av Bo Juhlin Norrköping 1986
8	PULS-modellen: Struktur och tillämpningar av Bengt Carlsson, Sten Bergström, Maja Brandt och Göran Lindström Norrköping 1987	8	Vågdata från svenska kustvatten 1985 av Jonny Svensson Norrköping 1986
9	Vågor i kraftverksmagasin beräknade med en numerisk modell av Lennart Funkquist Norrköping 1987	9	Oceanografiska stationsnät Svenskt Vattenarkiv av Barry Broman Norrköping 1986
10	Application of the HBV-Model to Bolivian Basins av Barbro Johansson, Magnus Persson, Enrique Aranibar och Roberto Lobet Norrköping 1987	10	PROBE - An instruction manual av Urban Svensson Norrköping 1986
11	Monthly streamflow simulation in Bolivian Basins with a stochastic model av Cecilia Ambjörn, Enrique Aranibar och Roberto Lobet Norrköping 1987	11	Spridning av kylvatten från Öresundsverket av Cecilia Ambjörn Norrköping 1987
12	De svenska huvudvattendragens namn och mynningspunkter av Kurt Ehler, Torbjörn Lindkvist och Todor Milanov Norrköping 1987	12	Oceanografiska observationer runt svenska kusten med kustbevakningens fartyg 1986 av Bo Juhlin Norrköping 1987
13	Analys av avrinningsserier för uppskattning av effektivt regn av Göran Lindström Norrköping 1987	13	SMHI:s undersökningar i Öregrundsgrepen 1986 av Jan Andersson och Robert Hillgren Norrköping 1987
14	Modellberäkning av extrem effektiv nederbörd av Maja Brandt, Sten Bergström, Marie Gardelin och Göran Lindström Norrköping 1987		
15	Sjukarte- och sjöbuppgifter. Register 1987 av Håkan Danielsson och Torbjörn Lindkvist Norrköping 1987		
16	Utvärdering av 1986 års vårflödesprognoser av Martin Häggström och Magnus Persson Norrköping 1987		
17	Skogs-skador - klimat av Bertil Eriksson, Barbro Johansson, Katarina Losjö och Haldo Vedin Norrköping 1987		
18	Bestämning av optimalt klimatstationsnät för hydrologiska prognoser av Maja Brandt Norrköping 1987		
19	Utvärdering av 1987 års vårflödesprognoser av Martin Häggström och Magnus Persson Norrköping 1988		
20	Frys-förluster av vatten av Todor Milanov Norrköping 1988		





Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut  
601 76 Norrköping. Tel 011-158000. Telex 64400 smhi s.