

# **BROFJORDENS KRAFTSTATION**

**Kompletterande simulering och analys av  
kylvattensspridning i Trommekilen**



# **BROFJORDENS KRAFTSTATION**

**Kompletterande simulering och analys av  
kylvattensspridning i Trommekilen**

av

Gustaf Westring



## Sammanfattning

Vattenfall AB planerar att lokalisera ett kraftverk intill Scanraff vid Brofjorden. SMHI i samarbete med Vatten Utveckling AB har av Vattenfall Energisystem AB fått i uppdrag att utreda kylvattensspridningen i området. Utredningen ska belysa om man genom lämpligt val av utsläppsarrangemang kan få en gynnsam uppvärmning av Hanneviken och därigenom förbättra förutsättningarna för en ostronodling norr om Hanneviksholmen, samt var man vintertid ska lokalisera utsläppet för att isbildningen i Hanneviken ska bli så opåverkad som möjligt. Som ett led i utredningen har SMHI tidigare producerat två rapporter.

Denna nya rapport utförs med delvis nya förutsättningar, baserar sig på en förbättrad numerisk modell och är inriktad på att bestämma hur höga övertemperaturerna vid kylvattenintaget blir. Beräkningarna görs för två kylvattenflöden, 8 och 4 m<sup>3</sup>/s. Tre alternativa utsläppspunkter prövas: en i Hanneviken (punkt A), en i yttre Trommekilen (punkt D), och en i inre Trommekilen (punkt C) nära kylvattenintaget. Kylvattnet tas från en punkt i inre Trommekilen på 5 meters djup (totalt djup 8 meter). Temperaturhöjningen av kylvattnet genom kraftverket är 10 °C. Det numeriska modellarbetet utfördes av Bengt Hemström, Vattenfall Utveckling AB, Älvkarleby.

Utredningens slutsatser är baserade på; hydrografiska mätningar i Brofjorden och Trommekilen/Hanneviken, tidigare SMHI rapporter, jämförelser med mätningar gjorda utanför andra svenska kraftverk, resultatet av det numeriska modellarbetet, och allmän referenslitteratur.



Övertemperaturen vid kylvattenintaget ( $T_I$ ):

Kylvattenutsläpp i punkt C ger alltför höga  $T_I$ . Inget utsläpp bör placeras i närheten av intaget. Utsläpp i punkt A kan också ge höga  $T_I$ , speciellt vid E vindar, men behövs för uppvärmning av Hanneviken. Vid utsläpp i punkt D kan  $T_I$  för flöden på 8 m<sup>3</sup>/s nå drygt 2 °C (för flöde = 4 m<sup>3</sup>/s cirka 0.6 °C). Recirkulations-drivande vindar är W-N. Följaktligen är utsläpp vid A och D en bra lösning. A används på vår, sommar och höst, och D på vintern och som reservutskov.

Övertemperaturen i centrala Hanneviken ( $T_H$ ):

Vid utsläpp i punkt A ger E-S vindar låga och NW-SW vindar höga  $T_H$ . Vid utsläpp i punkt D ger W-N vindar höga och E-S vindar låga  $T_H$ . Maximala och minimala  $T_H$  fördelar sig på följande vis:

flöde (m <sup>3</sup> /s)	Punkt A - $T_H$ (°C)		Punkt D - $T_H$ (°C)	
	min	max	min	max
8	1.0	6.0	0.0	2.0
4	0.5	4.0	0.0	1.0

Utsläpp i punkt A ger följaktligen goda förutsättningar för en kontinuerlig uppvärmning av Hanneviken. För utsläpp i punkt D blir uppvärmningen av Hanneviken marginell och normalt borde  $T_H$  ligga under 1 °C.

Hannevikens isbeläggning:

Hanneviken är isbelagd cirka 60 % av alla vintrar. Under dessa vintrar ligger isen 14 dagar - 3 månader. Som följd av de övertemperaturer som ett kylvattenutsläpp i punkt D medför innebär, kommer viken i genomsnitt få 4 - 5 dagar kortare isbeläggning under en isvinter.





<u>Innehåll</u>		Sid
1	INLEDNING	1
2	BAKGRUND OCH MODELLFÖRUTSÄTTNINGAR	5
2.1	Inledning	5
2.2	Grundförutsättningar	5
2.3	Vindinducerade strömmar	6
2.4	Vinddrivningar och recirkulation	6
2.5	Stationärt tillstånd	6
2.6	Densitetseffekter modelleras	7
2.7	Värmeavgivning till atmosfären	7
2.8	Ofullständig initialinblandning	7
2.9	Modellarbete	8
3	MODELLRESULTAT MED KOMMENTARER	8
3.1	Inledning	8
3.2	Kylvattenutsläpp vid A	8
3.3	Kylvattenutsläpp vid C	14
3.4	Kylvattenutsläpp vid D	20
3.5	Jämförelse av resultat med kommentarer	20
3.6	Sammanfattning av modellens resultat	25
4	DISKUSSION	26
4.1	Inledning	26
4.2	Stabilisering vid recirkulation i modellen	26
4.3	Värmeavgivningskoefficienten	26
4.4	Maximal recirkulationsrisk	27
4.5	Landtopografins inverkan på vinden	27
4.6	Övertemperaturerna i verkligheten	27
4.7	Is i Hanneviken	28
4.8	Vindriktning vid utsläpp i punkt D	28
5	SLUTSATS	29
5.1	Övertemperaturen vid kylvattenintaget	29
5.2	Övertemperaturen i centrala Hanneviken	29
5.3	Övrigt	30
5.4	Rekommendation	30
	REFERENSER	31



## 1 INLEDNING

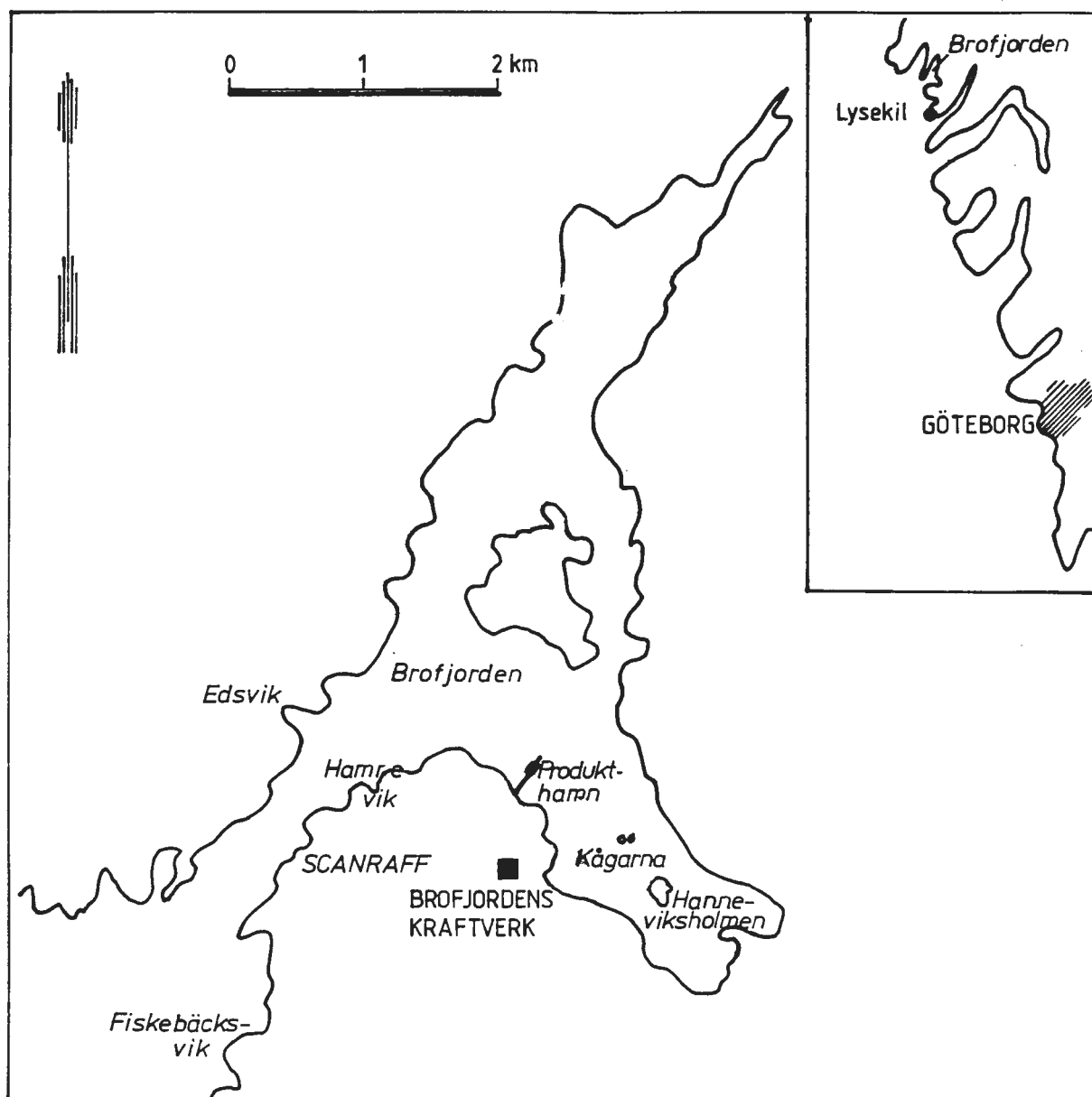
Vattenfall planerar att lokalisera en restoljeförgasningsanläggning intill Scanraff vid Brofjorden. Anläggningens intag och utsläpp ämnas placeras någonstans utmed Trommekilens/Hannevikens SW kust, se figur 1. SMHI i samarbete med Vattenfall Utveckling AB har av Vattenfall Energisystem AB fått i uppdrag att utreda kylvattensspridningen i området.

Utredningen ska framförallt belysa:

- 1) vilka kombinationer av utsläpp och intag som ger minst risk för recirkulation.
- 2) var man vintertid ska lokalisera kylvattenutsläppet för att isbildningen i Hanneviken ska bli så opåverkad som möjligt.
- 3) om man genom lämpligt val av utsläppsarrangemang kan få en gynnsam uppvärmning av Hanneviken och därigenom förbättra förutsättningarna för en tänkt ostronodling norr om Hanneviksholmen.
- 4) hur man generellt minimerar kylvattenutsläppets effekter på miljön.

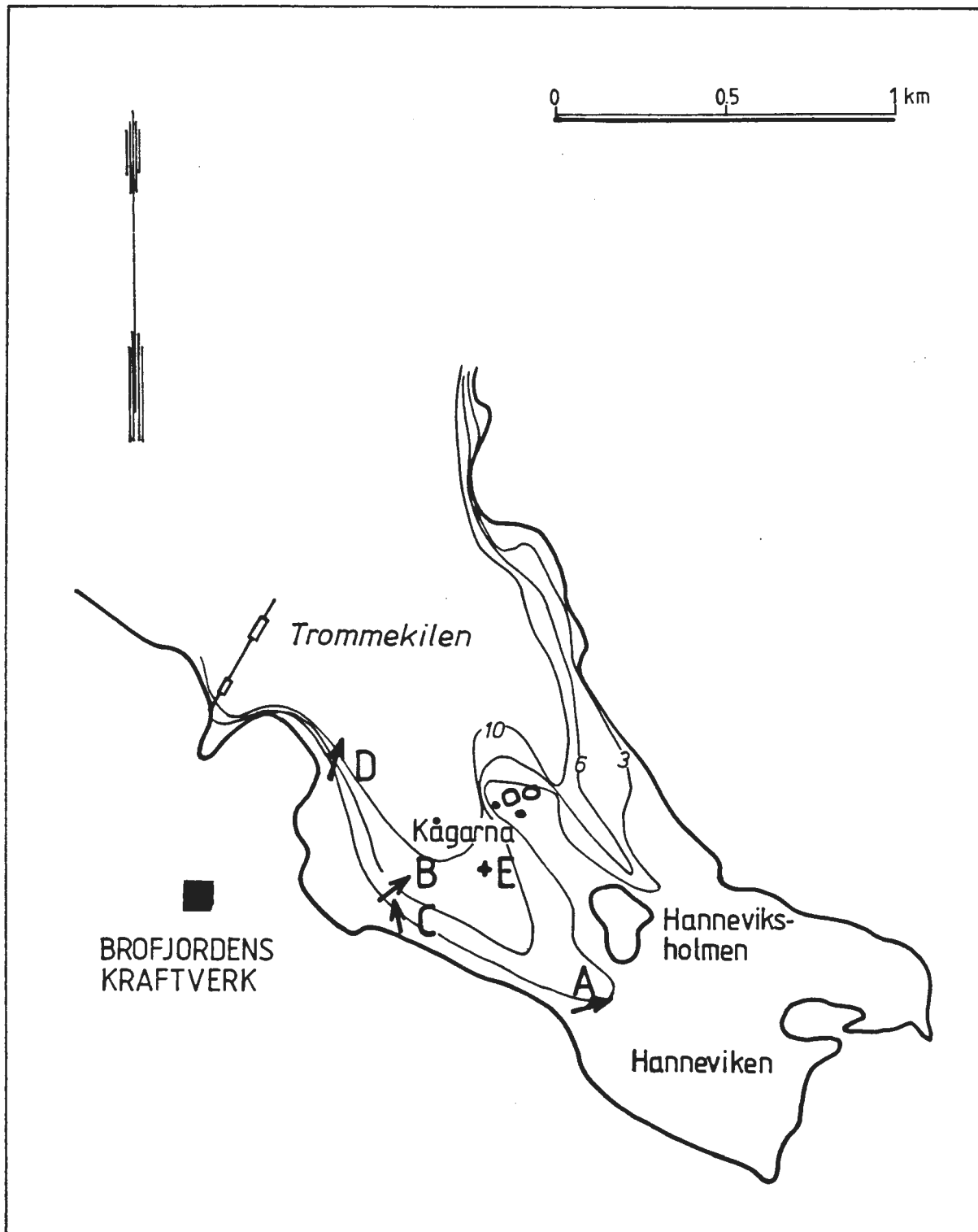
Som ett led i utredningen av kylvattenaspekterna på Brofjordens kraftverk har SMHI tidigare producerat två rapporter. Den första, Ambjörn (1989), analyserar de oceanografiska förhållandena i Brofjorden och Trommekilen, samt ger med modellen av Prych (1972) kylvattnets spridning i grova drag. Den andra, Andersson, Becker & Hillgren (1990), redogör för ström- och vindmätningar utförda i Trommekilen/Hanneviken, plus simulerar med hjälp av den numeriska modellen PHOENICS (Spalding, 1981) kylvattnets spridning. För att få en god bild av de förutsättningar som denna rapport baserar sig på bör läsaren ta del av till ovannämnda rapporter/artiklar.





Figur 1: Översiktskarta över Brofjorden med tänkt läge för Brofjordens kraftverk





Figur 2: Karta över Trommekilen och Hanneviken  
A, B, C, D = kylvattenutsläppspunkter  
med utsläppets riktning  
E = kylvattenintag





I detta nya arbete utförs ytterligare beräkningar med hjälp av den numeriska modellen PHOENICS, med delvis nya förutsättningar: nytt läge för kylvattenintaget, flera alternativa placeringar av utlopp, ändrade kylvattenflöden, samt en förbättrad matematisk modell i PHOENICS. De nya förutsättningarna gör att beräkningarna är inriktade på att bestämma hur mycket av det utsläppta kylvattnet som recirkuleras till intaget.

Modifikationer och nya förutsättningar beskrivs i kapitel 2 . I kapitel 3 beskrivs resultatet av modelleringen. Kapitel 4 diskuterar modellens begränsningar och hur modellresultatet ställer sig i förhållande till verkligheten. Till sist redovisas slutsatser och rekommendationer i kapitel 5.



## 2 BAKGRUND OCH MODELLFÖRUTSÄTTNINGAR

### 2.1 Inledning

Under hösten 1990 utfördes matematiska simuleringar (Andersson et al.) av kylvattenutsläpp lokaliserade vid A och B, se figur 2. Detta arbete avsåg att undersöka möjligheterna att erhålla en önskvärd uppvärmning av Hanneviken och därigenom förbättra förutsättningarna för en ostronodling norr om Hanneviksholmen (utsläpp A). Samtidigt gjorde krav på bibehållen sannolikhet för isbildning i Hanneviken att ett reservvinterutskov behövdes längre ut i Trommekilen (utsläpp B). Resultatet visade att det fanns goda förutsättningar att under vår, höst och sommar värma upp Hanneviken (övertemperaturer på 1.5 - 4.5 °C i centrala delar). Däremot gav utsläpp vid B övertemperaturer på mellan 0.5 och 3.5 °C i Hanneviken. En markant minskning av sannolikheten för isbildning.

### 2.2 Grundförutsättningar

De nya beräkningarna utförs med samma numeriska modell som i Andersson et al. men med vissa modifikationer och delvis nya förutsättningar. Kylvattnet, som i Andersson et al. togs från Fiskebäcksvik, se figur 1, tas nu från Trommekilen i punkt E, se figur 2. Intaget av kylvattnet sker på 5 meters djup vid ett totalt djup på 8 meter). Beräkningarna utförs därför framförallt för att bestämma hur mycket av det utsläppta kylvattnet som recirkuleras till intaget. Vidare utförs beräkningar för två kylvattenflöden, 4 respektive 8 m<sup>3</sup>/s (tidigare 7.5 m<sup>3</sup>/s). Temperaturförhöjningen hos kylvattnet är liksom tidigare 10 °C. Med hänsyn till den önskvärda isbildningen i Hanneviken utförs beräkningar för utsläpp i punkt A och C, samt för den nya utsläppspunkten D, se figur 2.

Liksom i Andersson et al. omfattar modellen den delar Brofjorden, i vilken Trommekilen och Hanneviken ingår, innanför linjen mellan Edsvik och Hamrevik, se figur 1, och kylvattenutsläppen sker alltid i de översta metrarna. Vattenutbytet med havet är ej modellerat och detta har stor betydelse i Trommekilens yttre delar.



### 2.3 Vindinducerade strömmar

Strömmar i Hanneviken och Trommekilen är till stor del orsakade av vindar. I de yttre delarna av Trommekilen är strömmarna dessutom påverkade av vattenutbytet med Skagerakk, orsakade av vertikala variationer i språngskiktets läge (se Ambjörn, 1989). Förändringarna av språngskiktets läge är starkt intermittenta och en datorsimulering kräver att interaktionen mellan vattenmassorna över och under språngskiktet modelleras. En dylik modellering är komplicerad och genomförs därför inte i detta skede av utredningen. Effekterna av språngskiktets rörelser har således försumrats. Den modifierade modellen betraktar således Brofjorden som en kylsjö avskild från havet vid linjen Edsvik - Hamrevik, se figur 1, och med ett maximalt djup på 15 meter (språngskiktets medelnivå). Denna förenkling medför att de beräknade övertemperaturerna blir högre än i verkligheten. Speciellt i Trommekilens yttre område som är starkt påverkat av vattenutbytet 200 m<sup>3</sup>/s med havet.

### 2.4 Vinddrivning och recirkulation

Beräkningarna utförs för en vindhastighet på 5 m/s. Denna hastighet ger dålig omblandning i ytlagret och ger dessutom höga övertemperaturer i Hanneviken om vinden är SE-SW (jämför med resultat Andersson et al. 1990). De vindriktningar som ger högsta övertemperaturen vid kylvattenintaget (punkt E) är E, SE och SW. Modellen tar ingen hänsyn till den inverkan marktopografin kan ha på vindstyrka och vindriktning.

Risken för recirkulation är störst på vintern. Densitetsskillnaden mellan kylvattnet och recipientens vatten är då minst och kylvattnet har därför störst benägenhet att nå djupare ner i vattenmassan. Detta leder dock även till ökad utspädning. De mest frekventa vindarna under vintern är W-SW (30 %) och NE-SE (40 %).

### 2.5 Stationärt tillstånd

Datorsimuleringen innebär att beräkningarna baseras på ett stationärt tillstånd, och förutsätter därför att den givna vinden och kylvattenflödet får verka under oändligt lång tid. Varaktigheten för en viss vindstyrka och -riktning är oftast av storleksordningen ett dygn. Därför kommer vinden ofta inte att verka tillräckligt länge för att ett tillstånd liknande det stationära skall uppnås. I den grunda Hanneviken får man dock en relativt snabb uppvärmning om utloppet är lokaliserat vid A.



## 2.6 Densitetseffekter modelleras

Eftersom kylvattenintaget flyttats till Trommekilen och eftersom en bättre vertikal separering av kylvatten och recipient än i Andersson et al. är önskvärd, simuleras i den nya modellen densitetseffekter. Detta sker genom att gravitationskraften inkluderas i momentumekvationen och att "bouyancy-termen" införs i K- $\epsilon$ -modellen. På så vis erhålles förbättrad modellering då vertikal densitetsgradient förekommer, och bättre uppskattning av övertemperaturerna vid kylvattenintaget. Salthalten i modellen har bestämts till 23 promille vilket är representativt för Brofjordens övre vattenlager.

I den grunda Hanneviken får densitetseffekter liten betydelse eftersom det ringa djupet i förhållande till strömhastigheterna leder till att ingen skiktning uppstår.

## 2.7 Värmeavgivning till atmosfären

För beräkning av värmeavgivning till atmosfären har ansatts en konstant värmeavgivningskoefficient på 23 W/m<sup>2</sup> per grad (°C) övertemperatur. Eftersom vattenutbytet med havet ej modelleras svarar värmeförlusterna till atmosfären för all bortförsel av värme från beräkningsområdet. Vid en dubbling av värmeavgivningskoefficienten visade sig modellen vara okänslig i närområdet till utsläppet, medan övertemperaturerna ungefär halveras periferi (övertemperaturer < 2 °C).

## 2.8 Ofullständig initialinblandning

I modellen ingår ingen fullständig simulering av den inblandning av recipientvatten som sker i början av kylvattenstrålens utlopp, då strålen själv är tillräckligt stark för att bestämma inblandningsförhållandena. Den storskaliga modell som används har en indelning i celler som är 50 meter breda, vilket är en långt ifrån tillräcklig upplösning för en god beskrivning av den initiella blandningen. Att koppla en handräkning av det initiella skedet till modellen har bedömts vara förknippad med alltför stor osäkerhet för att vara användbar. En modellering av initialblandningen skulle ge en något ökad inblandning av kallare recipientvatten och därmed en snabbare utspädning av kylvattenet. Det är således konservativt att i beräkningarna ofullständigt beskriva initialblandningen.





## 2.9 Modellarbete

Det numeriska modellarbetet som utgör basis för denna nya undersökning har utförts av Bengt Hemström vid Vattenfall Utveckling AB, Älvkarleby, Sverige.

## 3 MODELLRESULTAT MED KOMMENTARER

### 3.1 Inledning

De numeriska modellberäkningar vars resultat presenteras i detta kapitel har utförts av Bengt Hemström, Vattenfall Utveckling AB. Modellkörningarna gjordes för tre olika utsläppspunkter (A, C och D, se figur 2) och utfördes framförallt med syftet att bestämma hur höga övertemperaturerna blir vid kylvattenintaget (punkt E), se figur 2 samt hur stor risken för recirkulation är (direkt och indirekt recirkulation). För varje utsläppspunkt gjordes körningar med två olika kylvattenflöden, 4 och 8 m<sup>3</sup>/s. Kylvattnets övertemperatur vid utsläpp ansattes till 10 °C.

Vid redovisning av resultaten används ett antal begrepp som bör förklaras. Med flöde menas den volym kylvatten som utsläpps i en viss punkt.  $T_I$  är den beräknade övertemperaturen vid kylvattenintaget.  $T_H$  är den beräknade övertemperaturen vid ytan i Hannevikens centrala del. De olika utsläppspunkterna och intaget finns beskrivna i figur 2.

### 3.2 Kylvattenutsläpp vid A

Resultat:

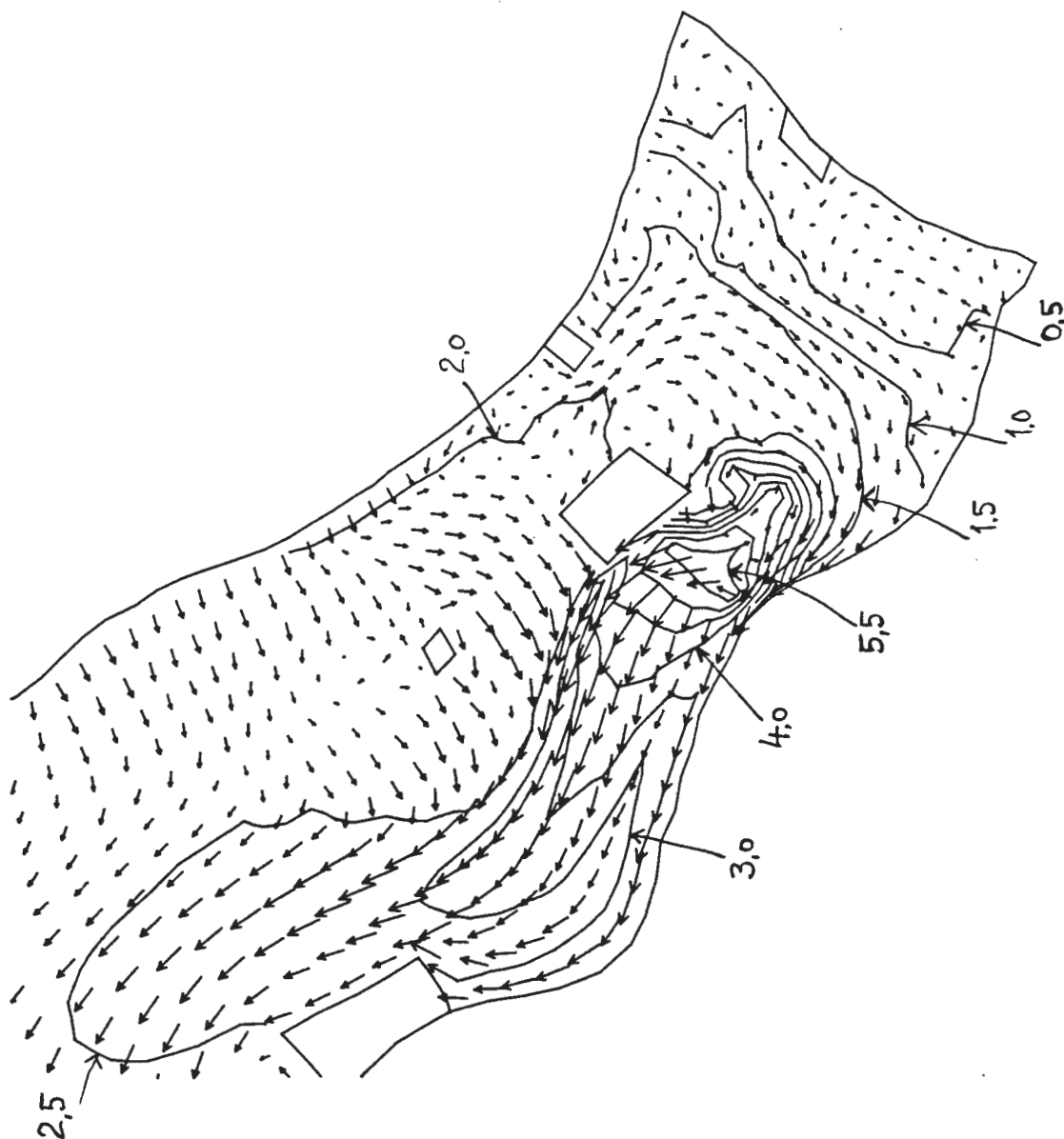
flöde (m <sup>3</sup> /s)	vindriktning	$T_I$ (°C)	$T_H$ (°C)	figur
8	E	2.7	1.7	3 - 4
8	SW	1.8	3.7	5
4	E	1.5	1.2	6
4	SW	1.0	2.7	7

Den, med avseende på recirkulation, ogynnsammaste vindriktningen, E, är det fall då kylvattenplymen driver direkt ned mot intaget, se figur 3 och 6. För de olika flödena beräknas den maximala övertemperaturen vid kylvattenintaget bli 2.7 respektive 1.5 °C. En halvering av flödet innebär alltså en drygt hälften så hög övertemperatur vid intaget.





Figur 3: Övertemperaturer vid vattenytan (ekvidistans 0.5 °C)  
 Utsläppsalternativ A  
 Kylvattenflöde = 8 m<sup>3</sup>/s  
 Vindriktning E



→ : 0.20 m/s.

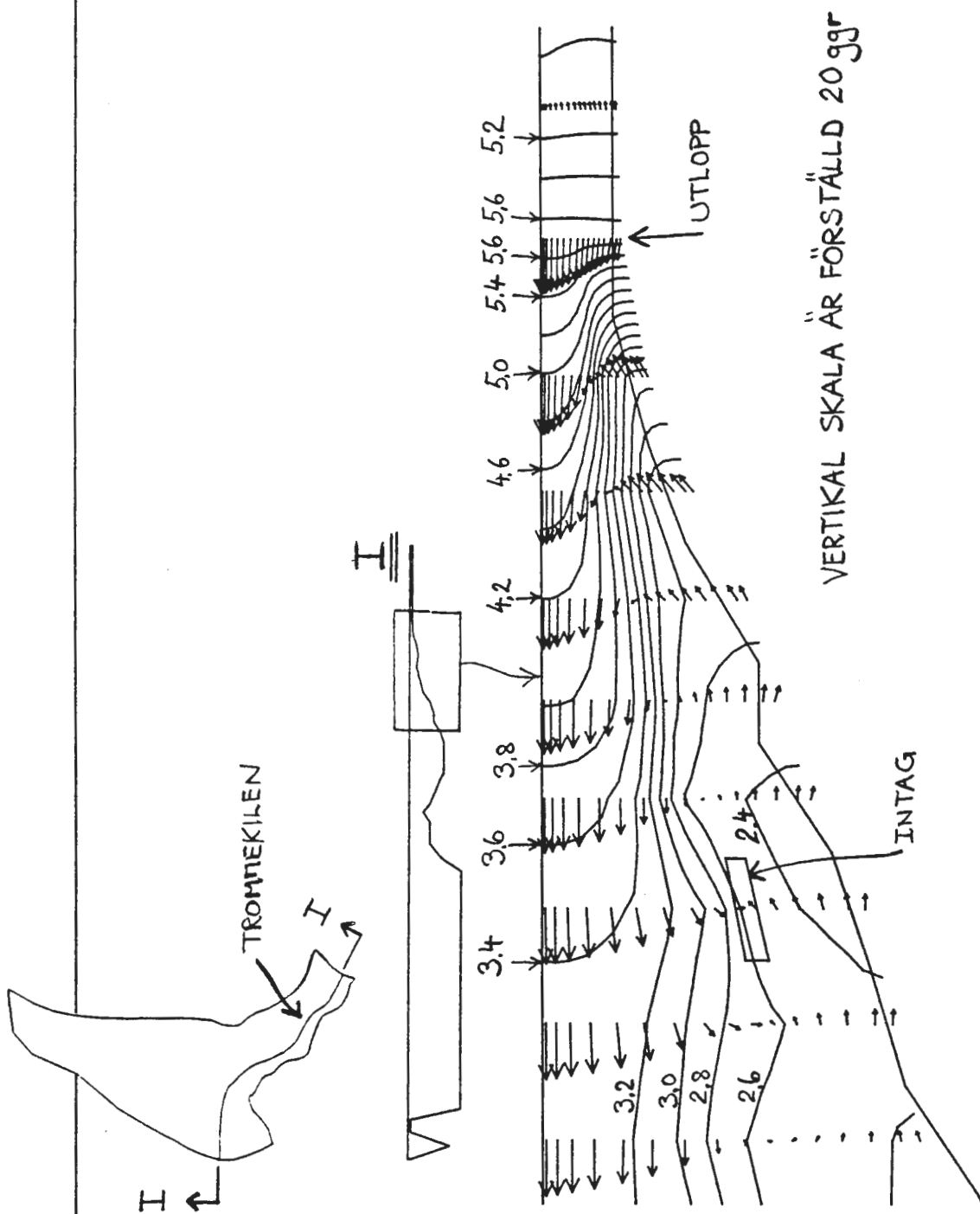
BRÖFJORDEN B201B

PHOENICS





Figur 4: Övertemperaturer i ett vertikalt snitt genom kylvattenintaget  
 (ekvidistans 0.2 °C)  
 Utsläppsalternativ A  
 Kylvattenflöde = 8 m<sup>3</sup>/s  
 Vindriktning E



→: 0.14 m/s.

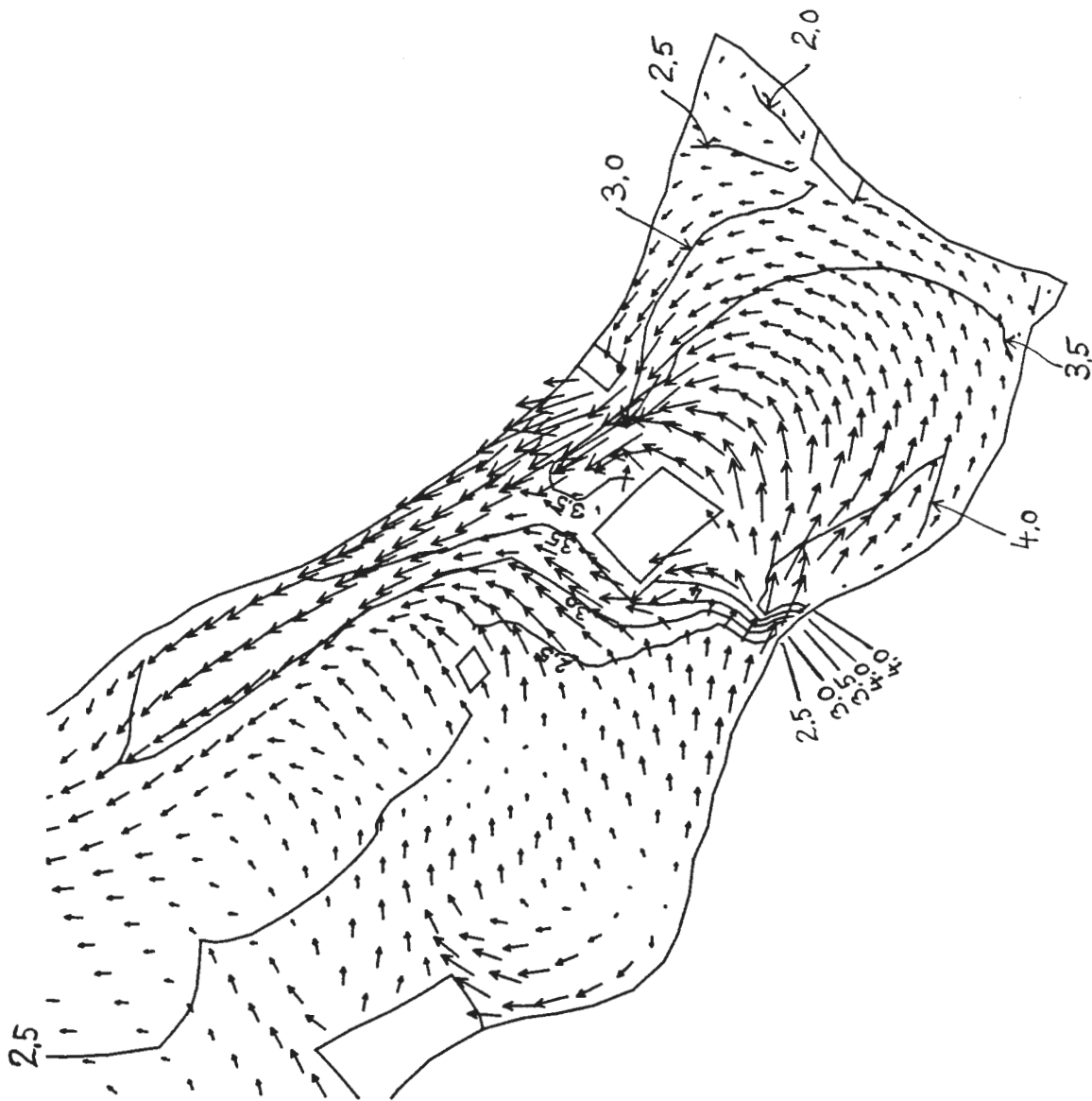
BRÖFJORDEN B201B

PHOENICS





Figur 5: Övertemperaturer vid vattenytan (ekvidistans 0.5 °C)  
 Utsläppsalternativ A  
 Kylvattenflöde = 8 m<sup>3</sup>/s  
 Vindriktning SW



→: 0.20 m/s.

BRÖFJORDEN B202

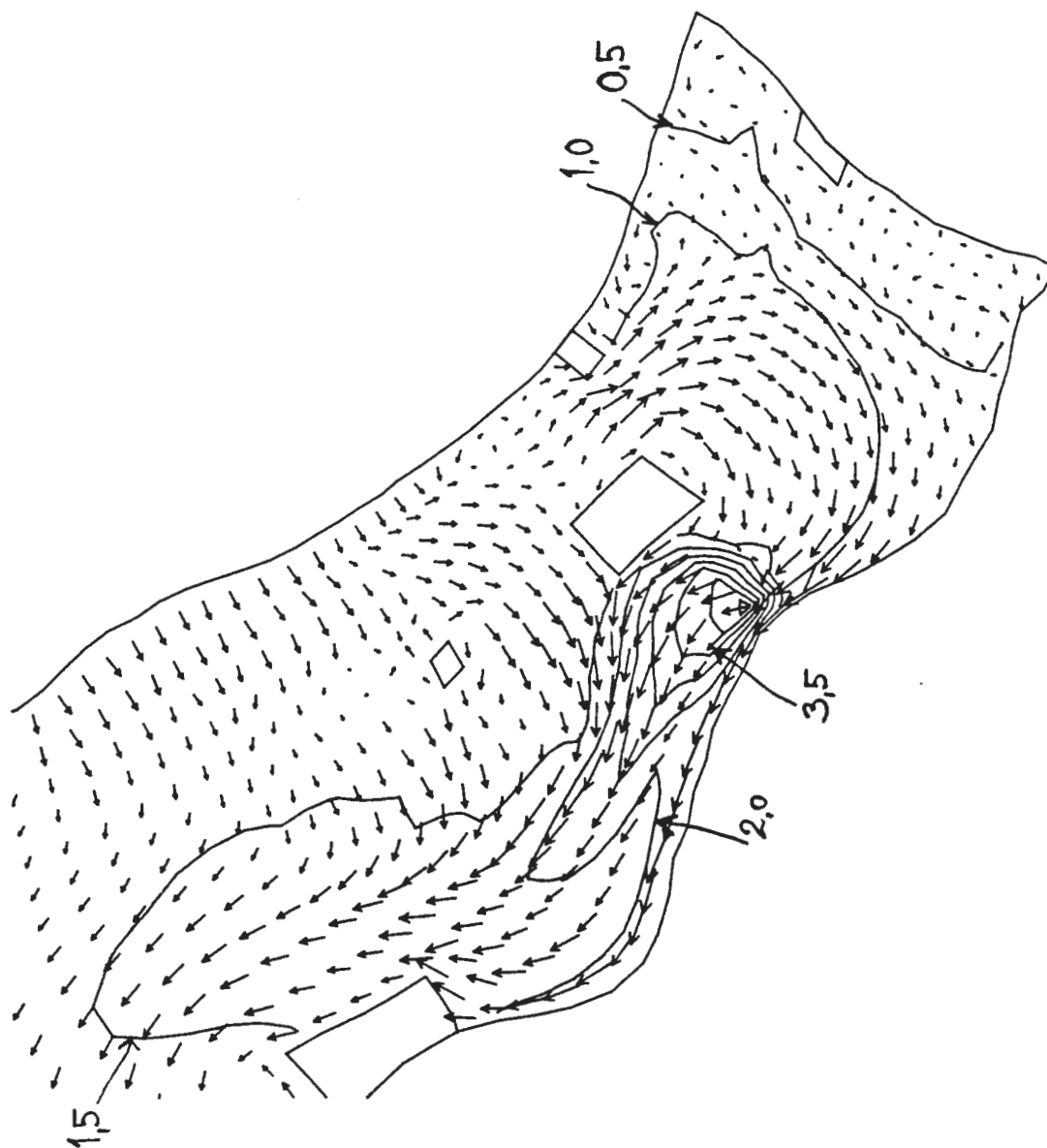
PHOENICS







Figur 6: Övertemperatur vid vattenytan (ekvidistans 0.5 °C)  
Utsläppsalternativ A  
Kylvattenflöde = 4 m<sup>3</sup>/s  
Vindriktning E



→: 0.20 m/s.

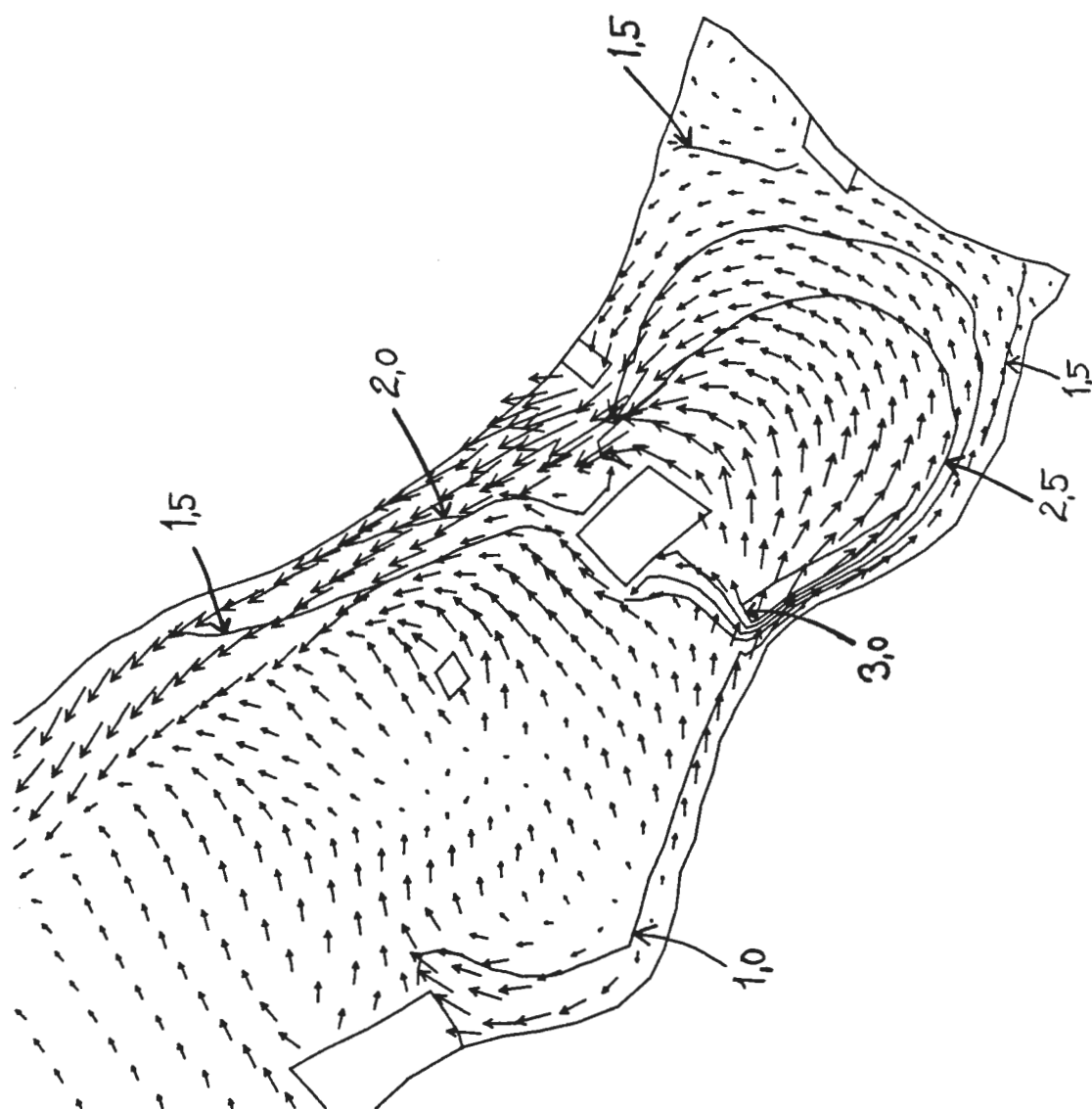
BROFJORDEN B203

PHOENICS





Figur 7: Övertemperatur vid vattenytan (ekvidistans 0.5 °C)  
Utsläppsalternativ A  
Kylvattenflöde = 4 m<sup>3</sup>/s  
Vindriktning SW



→: 0.20 m/s.

BROFJORDEN B204

PHOENICS



Däremot minskar ytvatten-övertemperaturen i centrala Hanneviken med endast 30 %. Vindar från SW ger lägst övertemperatur vid kylvattenintaget och högst ytvatten-övertemperatur i centrala Hanneviken.

Jämförda med de spridningsbilder som presenteras i Andersson et al. blir de nya ytvatten-övertemperaturerna i centrala Hanneviken endast obetydligt lägre (för flöde = 8 m<sup>3</sup>/s). De nya avkylningsytorna blir arealmässigt något mindre, framförallt i övertemperaturernas lägre register.

### 3.3 Kylvattenutsläpp vid C

Resultat:

flöde (m <sup>3</sup> /s)	vindriktning	T <sub>I</sub> (°C)	T <sub>H</sub> (°C)	figur
8	SW	2.8	2.4	8
8	SE	2.3	2.1	9
8	E	2.3	2.0	10
4	SW	1.7	1.5	11
4	E	1.4	1.2	12

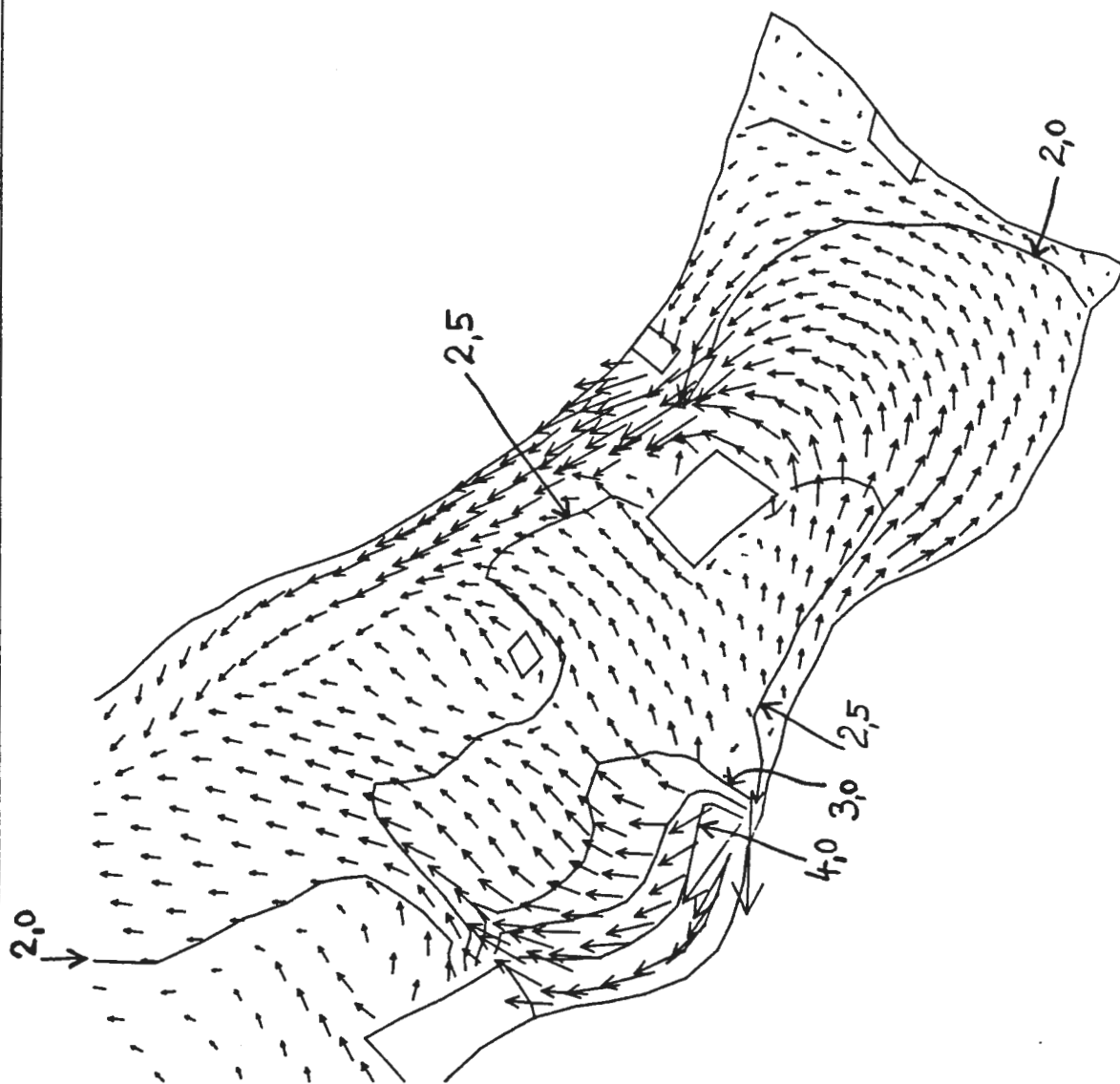
SW vindar ger de högsta övertemperaturerna vid såväl kylvattenintaget som i centrala Hanneviken. Ett halverat kylvattenflöde ger drygt hälften så höga övertemperaturer vid såväl intaget som i centrala Hanneviken. Vindar från E och SE ger högsta övertemperatur vid intaget men ändå inte mycket lägre än den maximala.

Jämfört med Andersson et al., då utsläppsalternativ B användes, ger de nya beräkningarna lägre övertemperaturer i centrala Hanneviken. Men eftersom utsläpp B och C är riktade åt olika håll är det svårt att göra jämförelser, se figur 2.





Figur 8: Övertemperatur vid vattenytan (ekvidistans 0.5 °C)  
 Utsläppsalternativ C  
 Kylvattenflöde = 8 m<sup>3</sup>/s  
 Vindriktning SW



→: 0.20 m/s.

BROF-JORDEN B301B

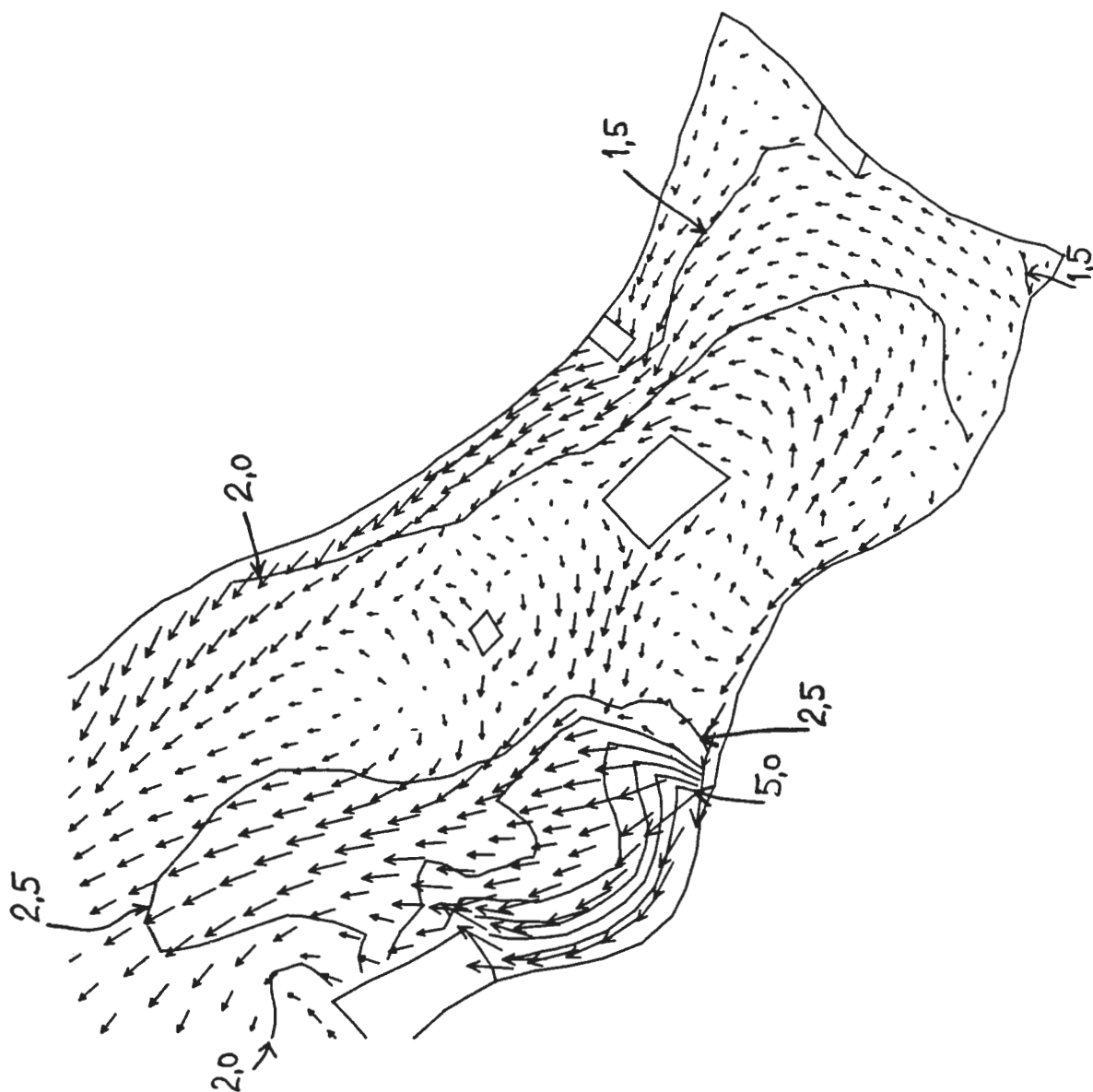
PHOENICS







Figur 9: Övertemperatur vid vattenytan (ekvidistans 0.5 °C)  
Utsläppsalternativ C  
Kylvattenflöde = 8 m<sup>3</sup>/s  
Vindriktning SE



→ : 0.20 m/s.

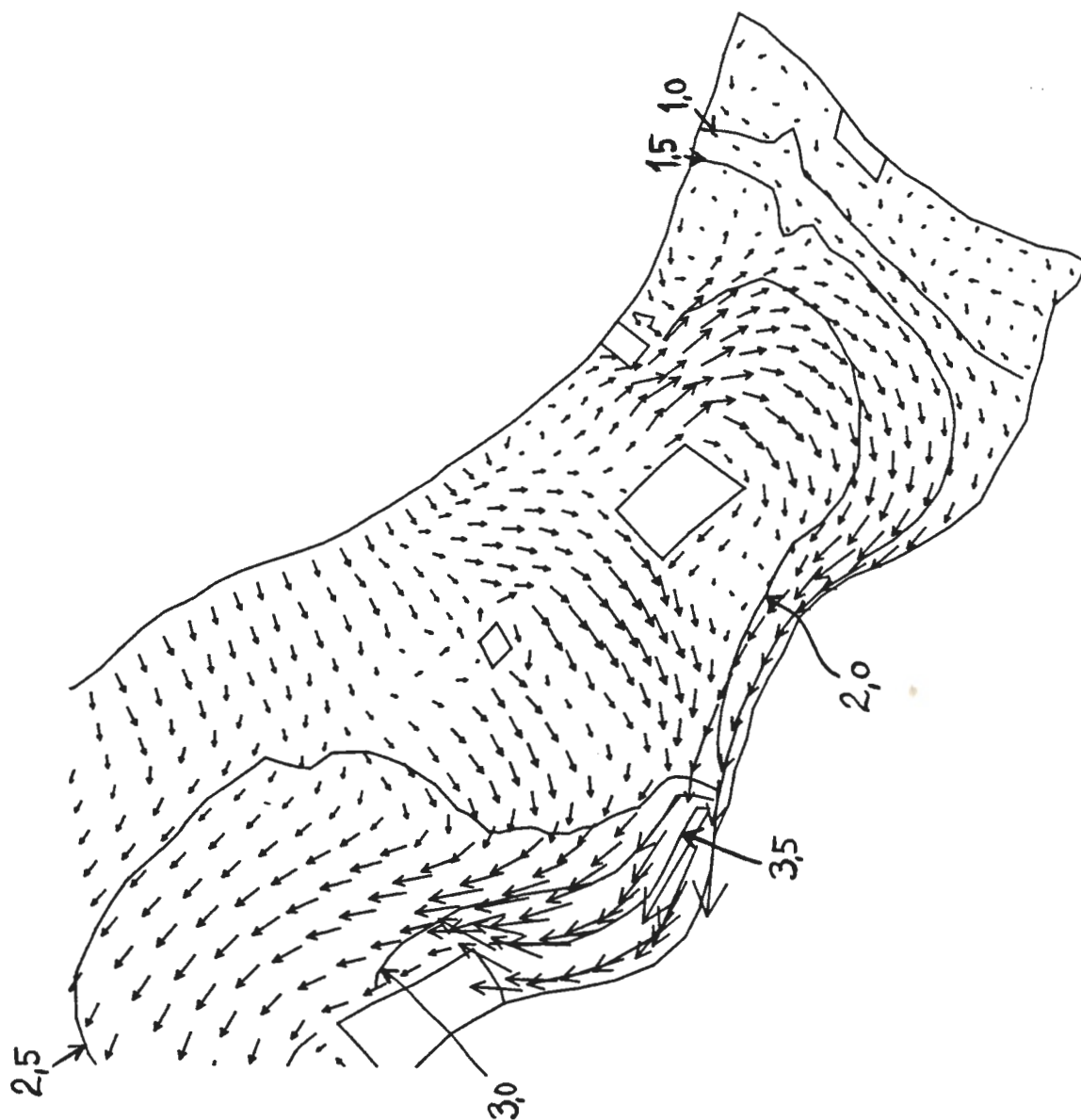
BROFJORDEN B304

PHOENICS





Figur 10: Övertemperatur vid vattenytan (ekvidistans 0.5 °C)  
 Utsläppsalternativ C  
 Kylvattenflöde = 8 m<sup>3</sup>/s  
 Vindriktning E



→: 0.20 m/s.

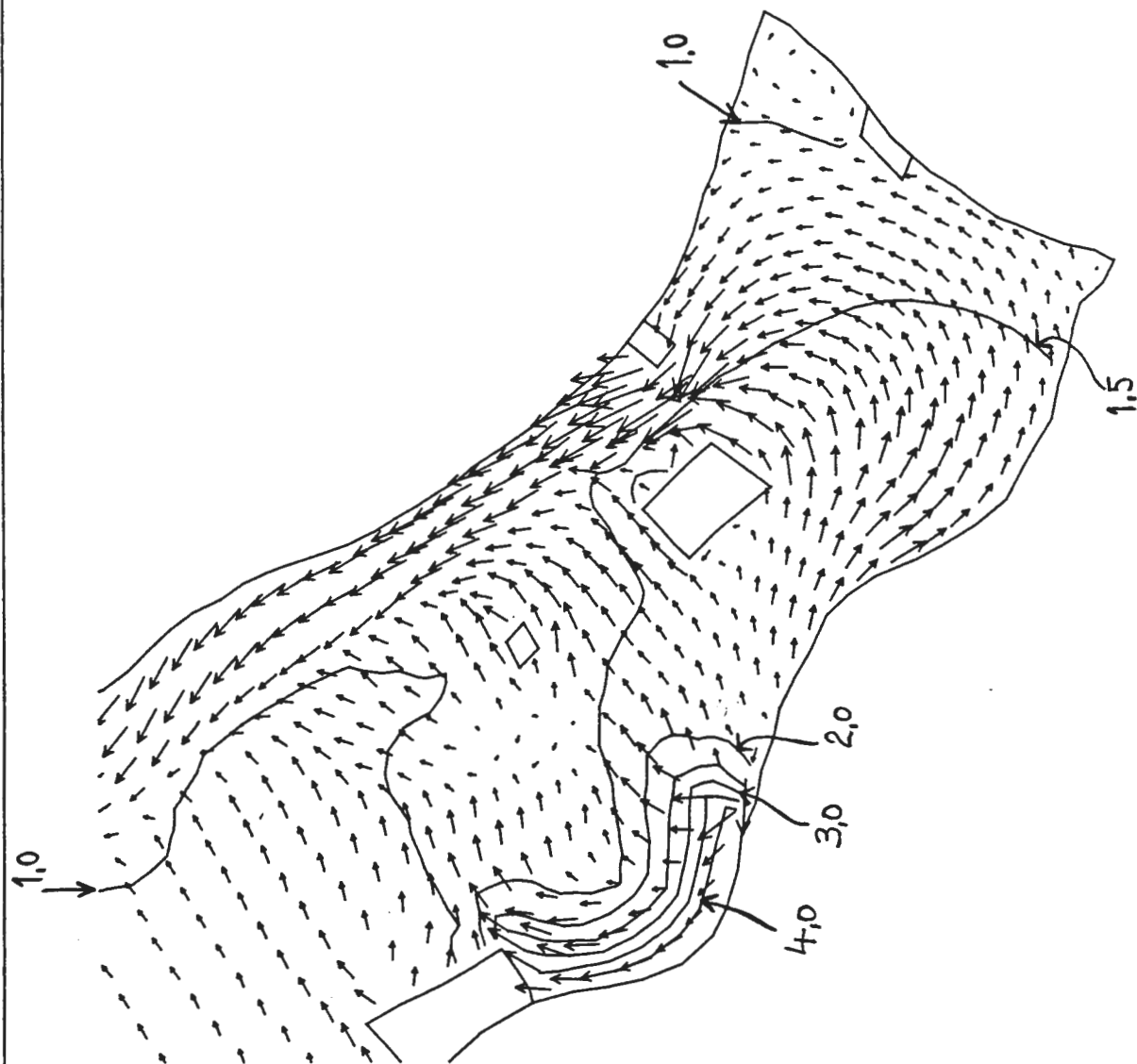
BRÖFJORDEN B303

PHOENICS





Figur 11: Övertemperatur vid vattenytan (ekvidistans 0.5 °C)  
 Utsläppsalternativ C  
 Kylvattenflöde = 4 m<sup>3</sup>/s  
 Vindriktning SW



→: 0.20 m/s.

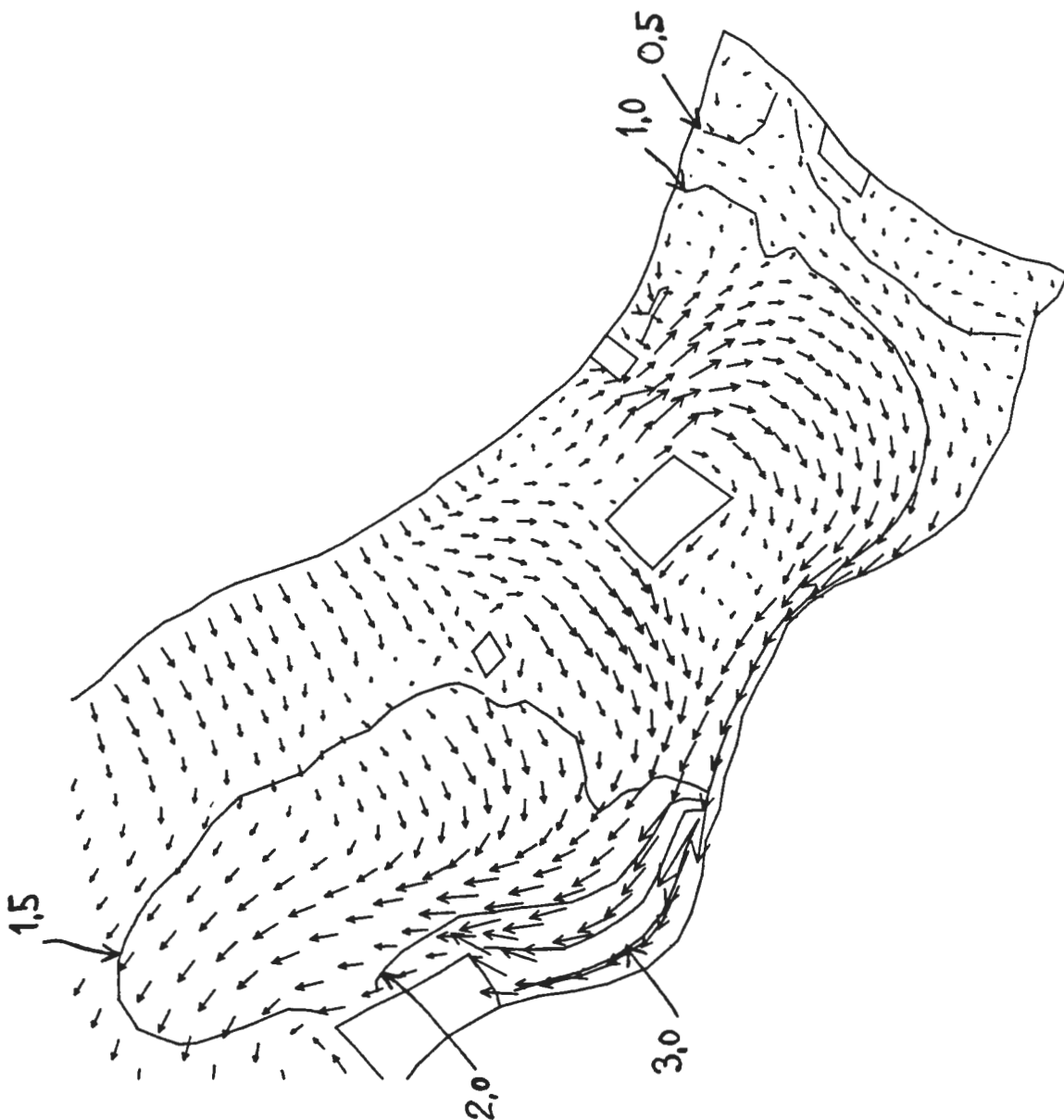
BROFJORDEN B302

PHOENICS





Figur 12: Övertemperatur vid vattenytan (ekvidistans 0.5 °C)  
 Utsläppsalternativ C  
 Kylvattenflöde = 4 m<sup>3</sup>/s  
 Vindriktning E



→: 0.20 m/s.

BROFJORDEN B305

PHOENICS





### 3.4 Kylvattenutsläpp vid D

Resultat:

flöde (m <sup>3</sup> /s)	vindriktning	T <sub>I</sub> (°C)	T <sub>H</sub> (°C)	figur
8	SW	2.4	2.2	13
8	E	2.1	1.9	14
8	NW	1.7	1.5	15
4	SW	1.4	1.3	16

Vindar från SW ger de högsta övertemperaturerna både vid intaget och i centrala Hanneviken. Lägsta övertemperaturen erhålls för NW vindar. En halvering av flödet innebär drygt hälften så höga övertemperaturer vid både intag och i centrala Hanneviken.

### 3.5 Jämförelse av resultat med kommentarer

Den maximala övertemperaturen vid de tre olika kylvattenutsläppen varierar mellan 2.4 (vid D) och 2.8 °C (vid C) för flöde 8 m<sup>3</sup>/s. En differens på 0.4 °C. Detta stämmer i princip bra med de faktum att C ligger närmast E (intaget), och att D ligger öppnare och på djupare vatten än A. Värdena för flöden på 4 m<sup>3</sup>/s överensstämmer med de för högre flöden. Vindriktningarna associerade till maximala T<sub>I</sub> är de förväntade. Minimivärden för T<sub>I</sub> följer samma mönster som maximivärdena, men ligger 0.3 - 0.9 °C lägre. Att skillnaden mellan max och min T<sub>I</sub> inte är större beror på att området är litet, djupen små, och att modellen avser ett stationärt tillstånd.

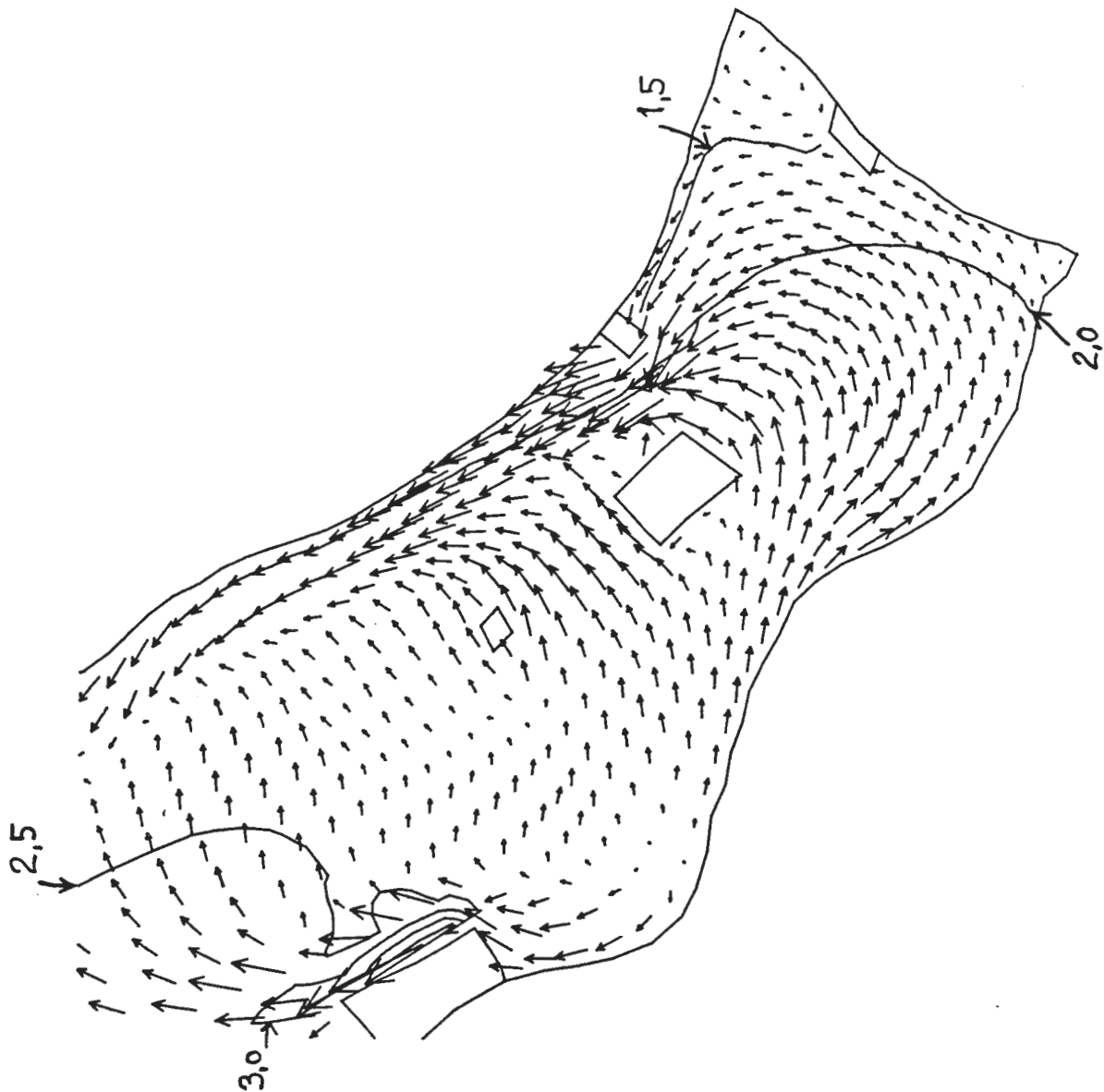
Ytvatten-övertemperaturerna i Hannevikens centrala del varierar, för flöde = 8 m<sup>3</sup>/s mellan 3.7 (A) och 1.5 °C (D), för flöde = 4 m<sup>3</sup>/s mellan 2.7 (A) och troligtvis cirka 1.0 °C (D). En halvering av kylvattenflödet leder följaktligen inte till sänkningar av ytvattenövertemperaturerna i Hanneviken i samma utsträckning. Det tycks även vara så att utsläpp i punkt D trots avståndet fortfarande ger relativt höga övertemperaturer i Hanneviken.

Om resultaten jämförs med de i Andersson et al. märks endast mindre skillnader vad gäller ytvatten-övertemperaturernas värden och spridningsmönster. Däremot är skillnaden naturligtvis stor i vertikal led eftersom kylvattnet i den gamla modellen blandades med hela vattenmassan och inte lagras på ytan som i nuvarande modell.





Figur 13: Övertemperatur vid vattenytan (ekvidistans 0.5 °C)  
Utsläppsalternativ D  
Kylvattenflöde = 8 m<sup>3</sup>/s  
Vindriktning SW



→ : 0.20 m/s.

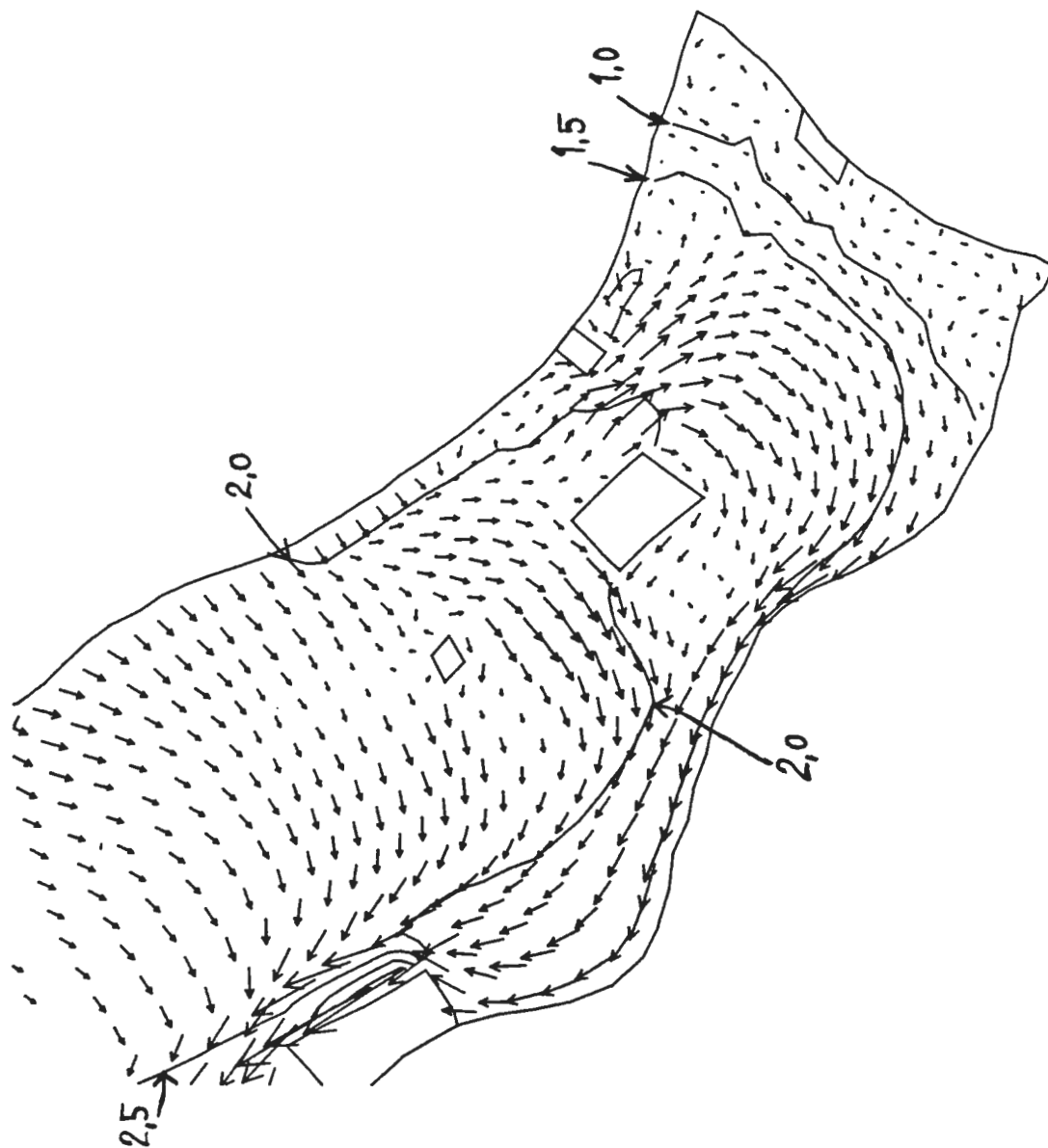
BRÖFJORDEN B404

PHOENICS





Figur 14: Övertemperatur vid vattenytan (ekvidistans 0.5 °C)  
Utsläppsalternativ D  
Kylvattenflöde = 8 m<sup>3</sup>/s  
Vindriktning E



→: 0.20 m/s.

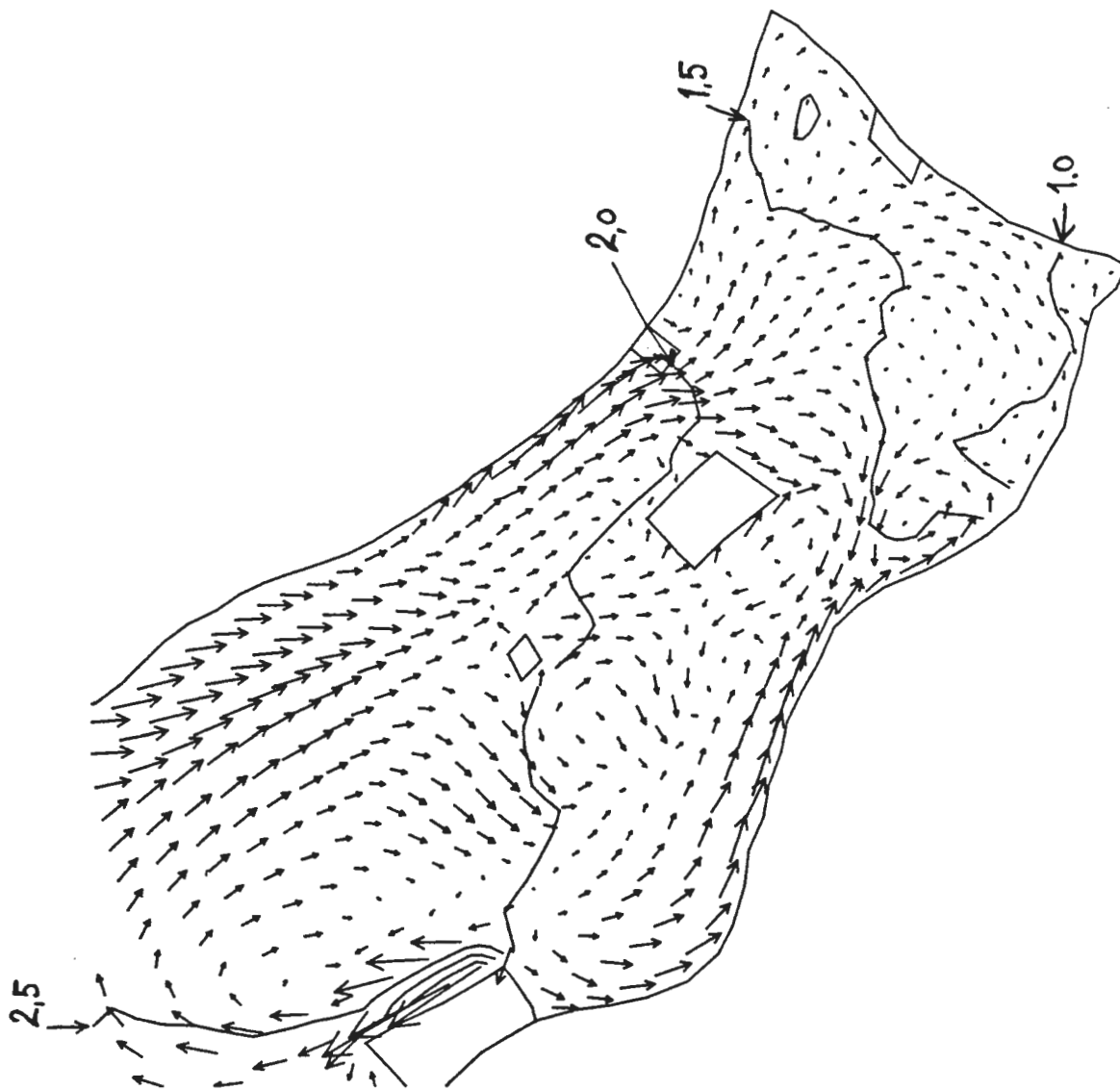
BRÖFJORDEN B403

PHOENICS





Figur 15: Övertemperatur vid vattenytan (ekvidistans 0.5 °C)  
 Utsläppsalternativ D  
 Kylvattenflöde = 8 m<sup>3</sup>/s  
 Vindriktning NW



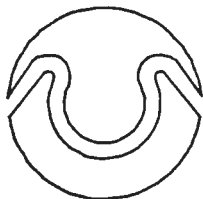
→: 0.20 m/s.

BROFJORDEN B401

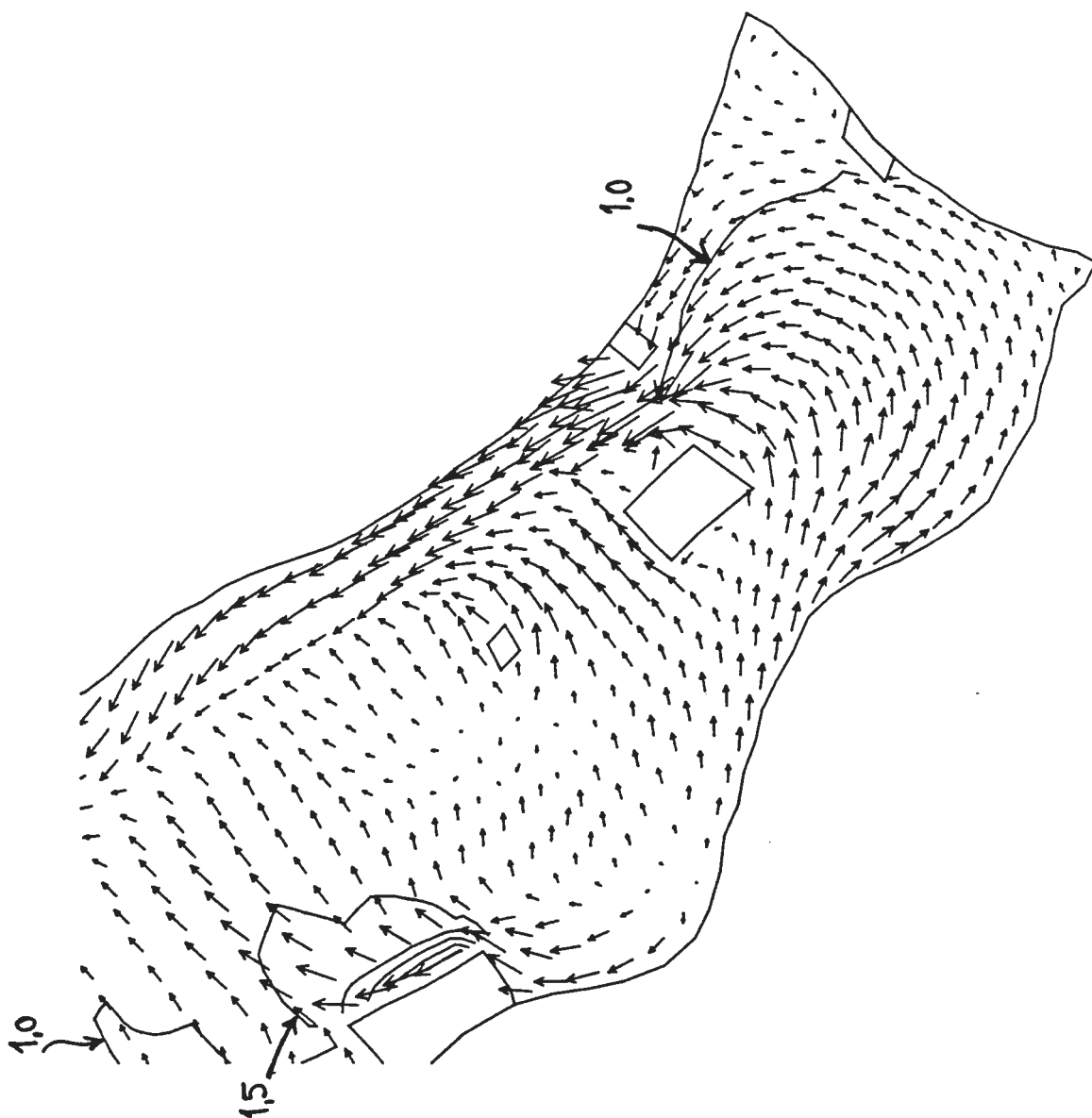
PH ENICS







Figur 16: Övertemperatur vid vattenytan (ekvidistans 0.5 °C)  
Utsläppsalternativ D  
Kylvattenflöde = 4 m<sup>3</sup>/s  
Vindriktning SW



↑: 0.20 m/s.

BROFJORDEN B406

PHOENICS



### 3.6 Sammanfattning av modellens resultat

De maximala övertemperaturerna vid kylvattenintaget varierar, för flöde = 8 m<sup>3</sup>/s mellan 2.4 (vid D) och 2.8 °C (vid D) och 1.7 °C (vid C). För utsläppspunkterna C och D inträffade de maximala övertemperaturerna vid SW vind, för punkt A vid E vind. Minimala värden vid utsläppen följer samma mönster som maximivärdena, men ligger 0.3 - 0.9 °C lägre.

Övertemperaturerna hos ytvattnet i Hannevikens centrala del varierar, för flöde = 8 m<sup>3</sup>/s mellan 3.7 (A) och 1.5 °C (D), för flöde = 4 m<sup>3</sup>/s mellan 2.7 (A) och cirka 1.0 (D). Följaktligen leder en halvering av flödet endast till en 30 % sänkning av övertemperaturerna i Hanneviken. Utsläpp i punkt D ger trots sitt avstånd till Hanneviken, relativt höga övertemperaturer i Hanneviken.



## 4 DISKUSSION

### 4.1 Inledning

Dagens numeriska modeller är mycket stora och intrikata och kan genom att köras på snabba datorer simulera naturliga förlopp på relativt kort tid. Däremot är de inte tillräckligt avancerade för att perfekt spegla naturen. När dessutom ekonomiska och tidsmässiga begränsningar appliceras blir resultatet ett närmevärde. Följaktligen är resultaten i kapitel 3 approximationer som behöver korrigeras för att ta hänsyn till modellens begränsningar. Sedan görs analyser, jämförelser och bedömningar för att nå vad som anses vara "svaret". Även svaret är dock en approximation.

### 4.2 Stabilisering vid recirkulation i modellen

Den numeriska modellen når ett resultat genom iteration. Den räknar alltså ut alla variabler, om och om igen, tills de stämmer sinsemellan. En av variablerna är övertemperaturen vid kylvattenintaget. Eftersom kylvattnet har en övertemperatur varje gång det når intaget kan tyckas att den absoluta temperaturen i systemet borde stiga i oändlighet. Detta sker dock vare sig i modellen eller i naturen utan övertemperaturen närmar sig istället ett gränsvärde vid vilket den stabiliserar sig. Provkörningar av modellen visar att som värst blir den stabila övertemperaturen 17 % högre än vad som redovisats i resultaten från modellkörningarna.

Detta spørsmål är dock mera en formsak eftersom naturen i verkligheten aldrig når en stabilisering - naturen är inte i ett stationärt tillstånd.

### 4.3 Värmeavgivningskoefficienten

För enkelhetens skull har värmeavgivningskoefficienten satts till ett för området representativt vintermedelvärde. Under sommaren är koefficienten lite högre. Men eftersom modellen är relativt okänslig för värmeavgivningsvariationer skulle en mer exakt metod inte ge något utslag i resultaten.



#### 4.4 Maximal recirkulationsrisk

Resultatet av modellkörningarna visar att övertemperaturerna vid kylvattenintaget är störst för E och SW vindar. Just dessa vindar är vanligast under vintern då densitetsskillnaden mellan kylvattnet och recipienten är minst. Recirkulationsrisken är därför störst på vintern och framförallt då vinden är E eller SW (beroende på utloppspunkt). Kraftverkets verkningsgrad behöver däremot inte nämnvärt försämrats eftersom vattnet på vintern ändå är kallt, och ett visst vind/ström förhållande varar sällan längre än ett dygn. Eftersom Brofjordens totala vattenvolym i genomsnitt byts ut var femte dag bör inte recirkulation vara ett problem ens under extrema förhållanden (förutsatt att kylvattenintag och utlopp väljs med omsorg).

#### 4.5 Landtopografins inverkan på vinden

Topografien kring Brofjorden är bergig (topparna uppemot 100 meter höga) med dalar genomkorsande landskapet. Gradientvinden kommer därför att påverkas av landskapet på ett märkbart sätt. Vindriktningen tenderar därför att styras i Trommekilens/Hannevikens NW/SE riktning, samt efter dalarnas NE/SW riktning. Som en följd härav kommer vindriktningen lokalt variera kraftigt. Den kuperade terrängen kommer även ge lä-effekter på vissa ställen och accelerera vinden genom trånga dalar.

Det enhetliga vindfält som driver strömmarna i modellen står inte att finna i verkligheten. Den ofta lokalt varierande vindsituationen kommer därför delvis förändra den spridningsbild som modellen förutspått.

#### 4.6 Övertemperaturerna i verkligheten

Datorsimuleringen behandlar inre Brofjorden som en insjö och den initiella inblandningen är ofullständigt behandlad. Därför är modellresultaten konservativa uppskattningar som ger övertemperaturer högre än i verkligheten. Detta gäller framförallt yttre Trommekilen som har lika gott vattenutbyte med Skagerakk som centrala Brofjorden.

Modellen avser ett stationärt tillstånd, vilket medför att extrema övertemperaturer undertrycks, speciellt minima. I verkligheten kan differensen mellan max och min övertemperaturer vid både kylvattenintaget och i centrala Hanneviken förväntas bli större. Det stationära tillståndet medför också ett klart och stabilt spridningsmönster. Under naturliga förhållanden med snabbt växlande väder, lokala vindförhållanden, och strömmar orsakade av vattenutbyte med havet kommer spridningsbilderna förvrängas.





Jämförelser mellan modellens resultatet och mätningar som utförts utanför existerande kraftverk (liknande det tänkta Brofjordens kraftverk) visar att modellen underskattar höga övertemperaturers ytareal men överskattar låga övertemperaturers ytareal - troligtvis eftersom modellen inte simulerar ett vattenutbyte med havet. I verkligheten är spridningsbilderna också mer diffusa och ger intryck av att vara kompositter (blandningar) av flera olika spridningsmönster.

De av modellen förutspådda maximi-övertemperaturerna vid kylvattenintaget kommer säkerligen uppnås någon gång men bör ses som extremvärden. Med tillgång till meteorologisk statistik kalkylerades hur ofta risken för recirkulation var stor: (för utsläpp D och W-N vind) = 10 % av tiden. För övriga utsläppspunkter var den maximala risken större.

#### 4.7 Is i Hanneviken

En enklare undersökning av isförhållandena i Hanneviken visar att cirka 60 % av de senaste 50 vintrarna har isen lagt sig. Isen har legat 14 dagar - 3 månaders tid. I genomsnitt ligger följaktligen isen i Hanneviken 4 - 6 veckor per år.

Under en genomsnittsvinter senareläggs isbildningen med ett dygn för varje grads övertemperatur i vattnet (gäller västkusten på Lysekils latitud). Den utloppspunkt som ger lägst övertemperaturer i centrala Hanneviken är punkt D, se figur 2. Vid ett flöde på 8 m<sup>3</sup>/s blir den maximala övertemperaturen i centrala Hanneviken 2.2 °C (för flöde = 4 m<sup>3</sup>/s blir  $T_H = 1.3$  °C).

Isläggningen i Hanneviken kommer därför senareläggas med cirka två dagar om kylvattenutsläppet lokaliseras till punkt D. Isen kommer också brytas upp 2 - 3 dagar tidigare. Totalt skulle kylvattenutsläppet i genomsnitt leda till 4 - 5 dagar kortare isperioder de år isen lägger sig (gäller utsläppspunkt D).

#### 4.8 Vindriktning vid utsläpp i punkt D

Enligt modellresultatet ska maximala  $T_I$  och  $T_H$  inträffa vid SW vindar och minimala vid NW vindar. Detta kan inte vara rätt. De högsta övertemperaturerna borde inträffa för W-N vindar och de lägsta för E-S vindar. Utloppsstrålens hastighet måste i detta fall fått alltför stort inflytande på cirkulationen.



## 5 SLUTSATS

### 5.1 Övertemperaturen vid kylvattenintaget ( $T_I$ )

Kylvattenutsläpp i punkt C, se figur 2, ger alltför höga övertemperaturer och ligger alltför nära kylvattenintaget i punkt E. Inget utsläpp bör placeras i närheten av intaget. Utsläpp i punkt A kan också ge höga  $T_I$ , speciellt vid E vindar, men behövs om Hanneviken ska värmas upp. Följaktligen behövs ett utsläpp ungefär vid punkt D som dels kan användas på vintern och dels användas som reservutskov på sommaren.

Vid utsläpp i punkt D kan  $T_I$  för flöden på 8 m<sup>3</sup>/s nå drygt 2 °C (för flöden på 4 m<sup>3</sup>/s drygt 1 °C), men risken för detta är stor endast 5 % av tiden. Normalt borde  $T_I$  ligga kring 1 °C eller lägre. Perioder med hög risk för recirkulation är korta, sällan längre än ett dygn, och inträffar oftast på vintern. W-N vindar, 6-10 m/s bedöms vara mest recirkulationsfarliga. Brofjorden är väl ventilerad och i genomsnitt byts allt vatten var femte dag. Att lokalisera kylvattenutsläppen vid A och D är därför en bra lösning, om kylvattenintaget ska placeras i inre Trommekilen och Hanneviken behöver värmas upp.

### 5.2 Övertemperaturen i centrala Hanneviken ( $T_H$ )

Den numeriska modellen ger goda riktvärden för  $T_H$ . Vid utsläpp i punkt A ger E-S vindar låga  $T_H$ , och NW-SW vindar höga  $T_H$ . I punkt D ger W-N vindar höga  $T_H$ , och E-S vindar låga  $T_H$ . Med vissa justeringar blir då minimala och maximala  $T_H$  ungefär enligt följande:

flöde (m <sup>3</sup> /s)	Punkt A - $T_H$ (°C)		Punkt D - $T_H$ (°C)	
	min	max	min	max
8	1.0	6.0	0.0	2.0
4	0.5	4.0	0.0	1.0

Utsläpp av kylvatten i punkt A ger alltså goda förutsättningar för uppvärmning av Hanneviken men temperaturvariationerna blir stora. Även vid utsläpp från punkt D kan relativt höga övertemperaturer erhållas men uppvärmningen skulle inte bli kontinuerlig.

För att erhålla en ansenlig och kontinuerlig uppvärmning av Hanneviken krävs ett utlopp vid punkt A, eller någon annanstans i Hanneviken.



### 5.3 Övrigt

I verkligheten kommer spridningsbilderna av kylvattenplymen vara mer komplicerade än enligt modellresultatet. Som tidigare påpekats förväntas övertemperaturen normalt bli lägre. Plymen kommer styras av snabbt växlande väder, lokala vindförhållanden, och strömmar orsakade av vattenutbytet med havet. Dessutom kommer nya plymer överlagras på äldre och därmed skapa kompositplymer.

Övertemperaturer i Hanneviken kommer att "bestå" längre än de i yttre Trommekilen eftersom dissipationen av värme är lägre där.

Hanneviken är isbelagd 60 % av vintrarna. Under dessa vintrar ligger isen 14 dagar - 3 månader. Som följd av de övertemperaturer som ett kylvattenutsläpp vid punkt D innebär kommer viken i genomsnitt få 4 - 5 dagar kortare isbeläggning under en isvinter.

### 5.4 Rekommendation

Med utgångspunkt från resonemanget i avdelningarna 5.1 - 5.3 skulle SMHI vilja föreslå:

Placera första kylvattenutsläppet på udden NW om punkt D (SE om produkthamnen). Utsläppspunkten bör ligga på 2 meters djup, minst några tiotals meter ifrån land. Kylvattenstrålen ska vara horisontellt riktad åt NE och utsläppshastigheten vara hög.

Placera andra kylvattenutsläppet ungefär vid punkt A, horisontellt riktat in i Hanneviken, på cirka halva vattendjupet. Utloppshastigheten beror på botten beskaffenhet och djupet (undvik erosion), men bör vara så hög som möjligt.

Placera kylvattenintaget i närheten av punkt E på cirka 5 meters djup (totalt vattendjup cirka 10 meter). Intaget bör konstrueras så att vatten sugas in horisontellt, ej uppifrån eller nerifrån.



## REFERENSER

Ambjörn, Cecilia 1989 *Oceanografiska förhållanden i Brofjorden i samband med kylvatten utsläpp i Trommekilen*  
SMHI Oceanografi nr 32

Prych, Edmund A. 1972 *A warm water effluent analyzed as a bouyant surface jet*  
SMHI Hydrologi nr 21

Wändahl, Thomas 1971 *Planerad kraftstation på Lysehalvön - lokalisering av kylvattenvägar*  
SMHI Hydrologi

Andersson, J., Becker, B. & Hillgren, R. (1990) *Brofjordens Kraftstation - kylvattenspridning i Hanneviken*  
SMHI Oceanografi nr 44

Spalding, D.B. 1981 *A general-purpose computer program for multidimensional one- and two-phase flow*  
J. Math. and Comput. in simulation, 23, pp 267 - 276







