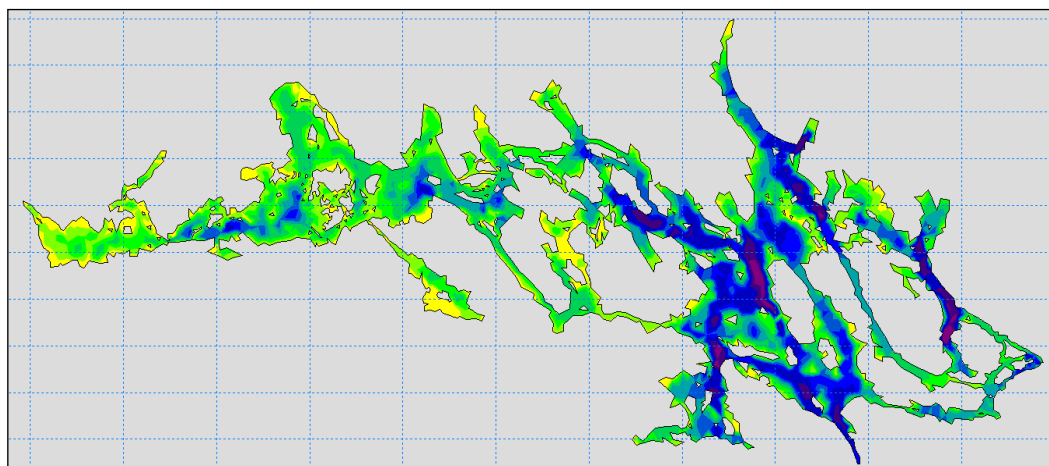


Mälarens Vattenvårdsförbund

Hydrodynamisk modellstudie av Mälaren



Uppdragsnummer
12801255

Lund 2010-09-10

 <p>ISO 9001 1993 ISO/IEC 17021</p>	<p>LEDNINGSSYSTEM FÖR KVALITET ENLIGT ISO 9001:2000</p>	
<p>Projektets namn: Strömningsmodell Mälaren</p>	<p>Projekt nr: 12801255</p>	
<p>Projektledare: Olof Liungman</p>	<p>Beställare: Mälarens Vattenvårdsförbund</p>	
<p>Kvalitetsansvarig: Olof Liungman</p>	<p>Beställarens ombud: Lars Edenman</p>	
<p>Handläggare: Charlotta Borell Lövestedt Patricia Moreno-Arancibia Olof Liungman</p>	<p>Granskad av / datum: Olof Liungman / 2010-09-10</p>	
<p>Rapport version: Slutrapport 2010-09-10</p>	<p>Godkänd av kvalitetsansvarig / datum: Olof Liungman / 2010-09-10</p>	

Sammanfattning

På uppdrag av Mälarens Vattenvårdsförbund har DHI Sverige AB (DHI) utfört en hydrodynamisk modellstudie av Mälaren med syftet att öka kunskapen om den övergripande cirkulationen i Mälaren samt att ta fram ett modellverktyg som kan användas i framtida studier och applikationer av olika slag.

En tredimensionell hydrodynamisk modell har byggts upp i verktyget MIKE 3 FM. Modellen har som indata a) Mälarens bottenpografi, b) tillflöden av vatten via vattendrag och markavrinning, c) meteorologi (vind, lufttemperatur, nederbörd, luftfuktighet och medelmolnighet), d) istäckt period samt e) vattenflöde alternativt vattenstånd vid de öppna ränderna i Stäket, Stockholm och Södertälje. I modellen beskrivs Mälarens topografi med hjälp av ett beräkningsnät bestående av ca 4600 trianglar och fyrkanter samt 23 djuplager. En period på ett år har simulerats och resultaten har sparats med en tidsupplösning på 6 timmar.

Resultaten från modellen stämmer rimligt väl överrens med uppmätta vattennivåer, temperaturprofiler samt flödet ut genom Stockholm. Dock var tillgången på mätdata begränsad, t.ex. saknas helt strömmätningar.

Resultaten från modellen visar att ytvattnet i Mälaren till stor del följer vindarnas riktning och styrka, särskilt under sommarperioden då vattnet är skiktat och tillförseln från vattendragen liten. I smala passager strömmar det däremot i passagernas längsriktning, både vid ytan och vid botten. Under vintern då sjön inte är täckt av is påverkas strömmarna också tydligt av större tillflöden, vilka genererar en transport mot Stockholm och Södertälje. Då sjön är istäckt domineras strömbilden helt av tillflödena.

Temperaturens fördelning över tid och djup beror på djupet, vinden samt närheten till större tillflöden. Språngskiktet återfinns på 10-15 m djup under juli och augusti men även in i september i de stora och djupa bassängerna.

Utbytet per år mellan vattenförekomsterna ger en bild av den övergripande transporten i Mälaren. Utbytet mellan olika vattenförekomster varierar inte bara i storlek utan även i hur det flödar. Mellan vissa vattenförekomster flödar det i huvudsak i en riktning medan det på andra platser flödar i båda riktningarna men på olika djup. Det kan alltså vara en väsentlig skillnad mellan bruttoutbytet och nettoflödet.

Vattnets ”ålder” (ett mått på uppehållstiden) i Mälaren varierar med vatten yngre än 60 dagar i Galten medan det i Södra och Norra Björkfjärdarna samt Långtarmen finns vatten som befunnit sig i Mälaren i över 3 år. Vattnet som flödar in via Stäket räknas som nytt vatten och därför är utgående vatten via Stockholm i medel något yngre än det äldsta vattnet som återfinns i sjön.

Syftet med modellen är att övergripande beskriva hela Mälaren och resultaten begränsas av den rumsliga upplösningen, kvaliteten på indata samt tillgången på kalibreringsdata. Det finns därmed både en förbättringspotential samt ytterligare möjligheter till analyser, beroende på vilken frågeställning som man önskar utreda.

Innehållsförteckning

Sammanfattning	ii
Innehållsförteckning	iii
1 Introduktion	1
2 Bakgrund	2
3 Metodik	3
3.1 Den hydrodynamiska modellen	3
3.2 Beräkningsnätet	4
3.3 Batymetri	5
3.4 Initialisering	5
3.5 Drivning	6
4 Resultat	19
4.1 Jämförelser med mätdata	19
4.2 Allmänt om cirkulationen i Mälaren	26
4.3 Temperatur	28
4.4 Vattenutbytet mellan vattenförekomsterna	31
4.5 Vattnets omsättningstid	34
5 Diskussion	35
6 Slutsatser	38
Referenser	39
Appendix 1. Beräkningsnätet.	40
Appendix 2. Batymetri	41
Appendix 3. Mälarens in- och utflöden.	42
Appendix 4. Gränser mellan vattenförekomster.	43
Appendix 5. Modellresultat - strömrosor.	44

1 Introduktion

Mälaren är Sveriges tredje största sjö och en viktig vattenresurs för dricksvatten, fiske, transport och rekreation i en tätbebyggd region. Samtidigt är sjön recipient för utsläpp från industrier, kommunala avlopp samt diffusa utsläpp från jordbruksmark, vilka transporteras vidare ut till Östersjön.

Mälarens Vattenvårdsförbund är intresserade av att kunna modellera förhållanden i Mälaren utifrån ett antal synvinklar, bl.a. utvärdering av miljöstatus, åtgärder för att förbättra vattenmiljön, råvattenkvalitet och vattenförsörjning, miljökonsekvensbeskrivningar, prognoser i samband med utsläpp, m.m.

För att till exempel utvärdera alternativa åtgärder för att minska närsaltsbelastningen på Mälaren och Östersjön krävs förbättrad kunskap om ämnestransport och retention i Mälaren. Beroende på var inom Mälarens tillrinningsområde som åtgärder genomförs kommer dessa att ha olika effekt med avseende på närsaltstransporten till havet, eftersom retentionen skiljer sig i olika delar av Mälaren. Med utökad kunskap ökar möjligheten att genomföra kostnadseffektiva åtgärder för att minska bl.a. fosfortillförseln till havet.

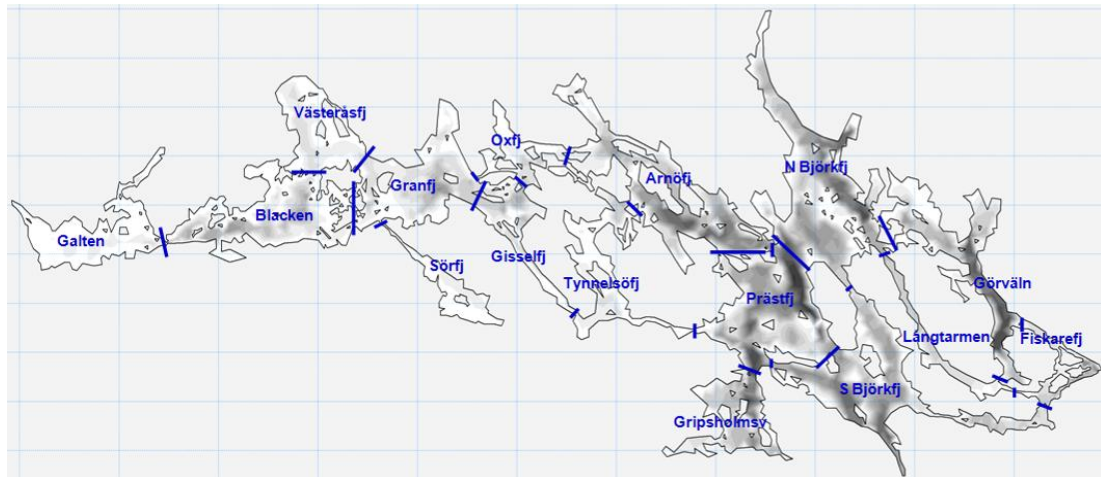
Som första steg har föreslagits en hydrodynamisk modellstudie med syfte att beskriva den övergripande cirkulationen och de fysiska förhållandena i Mälaren och därmed bidra till ökad kunskap om Mälaren. DHI Sverige AB (DHI) genomförde därför under våren 2009 en förstudie med syfte att sammanställa befintligt underlag samt ta fram ett lösningsförslag (se ”En strömningsmodell för Mälaren – förstudie”). På uppdrag av Mälarens Vattenvårdsförbund presenteras här en modellstudie baserad på det lösningsförslag som beskrevs i ovan nämnda förstudie.

Syftet med studien är följande:

- Att öka kunskapen om den övergripande cirkulationen i Mälaren, d.v.s. beskriva dynamiken i de fysiska förhållandena med avseende på strömmar och skiktning samt hur dessa beror av olika drivande faktorer, med fokus på vattnet som transporterande medium.
- Att ta fram ett modellverktyg som kan återanvändas för framtida studier och applikationer av olika slag.

2 Bakgrund

Mälaren, som är Sveriges tredje största sjö, sträcker sig från Köping i väst till Stockholm i öst och har en yta på ca 1096 km². Mälaren är en relativt grund sjö med ett medeldjup på 12,8 m. Dessutom är 20 % av sjön grundare än 3 m. De större djupen finns i de östra delarna av sjön, där ett maxdjup på ca 63 m uppmäts. Mälaren består både av vikar, smala sund, fjärdar, öar och stora öppna vattenområden. Sjön är idag uppdelad i ett stort antal vattenförekomster, men det pågår en utvärdering av denna indelning. Av praktiska skäl har i föreliggande studie ett antal av dessa vattenförekomster slagits samman till totalt 16 stycken vattenförekomster (se Figur 2-1).



Figur 2-1 Karta över Mälaren och de sammanslagna vattenförekomster som används i föreliggande studie.

De hydrodynamiska förhållandena i Mälaren beskrivs i första hand av strömmarna, vattenutbytet mellan de olika vattenförekomsterna och temperaturen. Vattenutbytet mellan vattenförekomsterna ger en bild av vilken väg vattnet flödar och kan även användas för att beräkna uppehållstiden i de olika vattenförekomsterna. Den vertikala fördelningen av temperaturen ger en uppfattning om hur skiktad eller omblandad vattenmassan är.

Hydrodynamiken i Mälaren påverkas främst av vindens hastighet och riktning samt de större tillflödena. Vinden påverkar vertikalomblandningen och strömmarna på kort tidskala medan tillflödena från vattendragen bestämmer den övergripande nettotransporten ut mot havet via Stockholm och Södertälje. Temperaturskiktningen som utvecklas under sommaren påverkar också hydrodynamiken genom att minska utbytet mellan botten och ytan. Likaså påverkar isen hydrodynamiken under vintern genom att reducera vindpåverkan.

De flesta av Mälarens tillflöden samt allt dess utflöde är reglerat. Inflödena regleras via ett antal vattenkraftverk medan utflödet regleras via slussar och kulvertar vid Riksbron, Stallkanalsdammarna, Karl Johan-slussen, Skanstull och Hammarbyslussen i Stockholm samt Södertäljeslussarna i Södertälje.

Mälarens avrinningsområde är 22 600 km² stort och omfattar skog, jordbruk och städer. Mälaren används som dricksvattentäckt för flertalet kommuner och är recipient för utsläpp från industrier och kommunala avlopp samt diffusa utsläpp från jordbruksmark. Sjön utnyttjas för fiske, båttransporter samt rekreation.

3 Metodik

För att kunna beskriva cirkulationen i Mälaren samt studera olika fenomen har en modellstudie gjorts. Detta innebär att en detaljerad tredimensionell numerisk hydrodynamisk modell har satts upp för Mälaren där hydrodynamiken simulerats under ett år. Den hydrodynamiska modellen beräknar strömmen, blandningen och temperaturen.

Den hydrodynamiska modell som används här är uppbyggd med hjälp av verktyget MIKE 3 FM (DHI 2009b) som ingår i DHI:s svit av modellverktyg *MIKE by DHI*. Dessa kommersiella mjukvaror används inom många olika frågeställningar av en stor mängd användare världen över. De är välbeprövade och inkorporerar den senaste tekniken. MIKE 3 FM är avsett för kust- och havsområden men används även för sjöar. MIKE 3 FM beskriver vattnets strömning och egenskaper i tre dimensioner, något som är nödvändigt för att kunna simulera strömmen på olika djup.

3.1 Den hydrodynamiska modellen

MIKE3 FM löser de grundläggande strömningsmekaniska ekvationerna som beskriver vattnets rörelse (strömmar) och egenskaper (densitet, temperatur, m.m.). Ekvationerna bygger på konservering av massa, rörelsemängd, värme, och turbulent kinetisk energi. Modellen beräknar strömmar, vattenstånd, temperatur och turbulens i ett tredimensionellt beräkningsnät som en funktion av tiden. MIKE 3 FM tar hänsyn till alla de viktigaste hydrodynamiska processerna:

- Vindens drivning på ytan
- Drivning på grund av vattenståndsvariationer
- Tillflöden av färskvatten från land
- Turbulent blandning
- Transport av värme
- Drivning på grund av variationer i densitet
- Bottenfriktion
- Värmeutbyte med atmosfären
- Coriolis-effekten p.g.a. jordens rotation

En mer detaljerad beskrivning av den hydrodynamiska modellen finns i dokumentationen till MIKE 3 (DHI 2009b).

I Tabell 3-1 listas de viktigaste hydrodynamiska tillståndsvariablerna, vilka också utgör modellresultaten.

Den hydrodynamiska modellen har satts upp för Mälaren och använts för att simulera ett helt år, närmare bestämt 2007, och har drivits av observationer från detta år. Detta beskrivs närmare nedan. Resultaten har extraherats ur modellen med ett tidssteg på 6 h medan det interna beräkningssteget för processerna är betydligt kortare.

Tabell 3-1 Tillståndsvariabler för den hydrodynamiska modellen.

Variabelnamn	Enhet	Antal dimensioner
Vattenstånd	m	2
Strömhastighet	m s ⁻¹	3
Turbulent viskositet	m ² s ⁻¹	3
Densitet	kg m ⁻³	3
Temperatur	°C	3

3.2 Beräkningsnätet

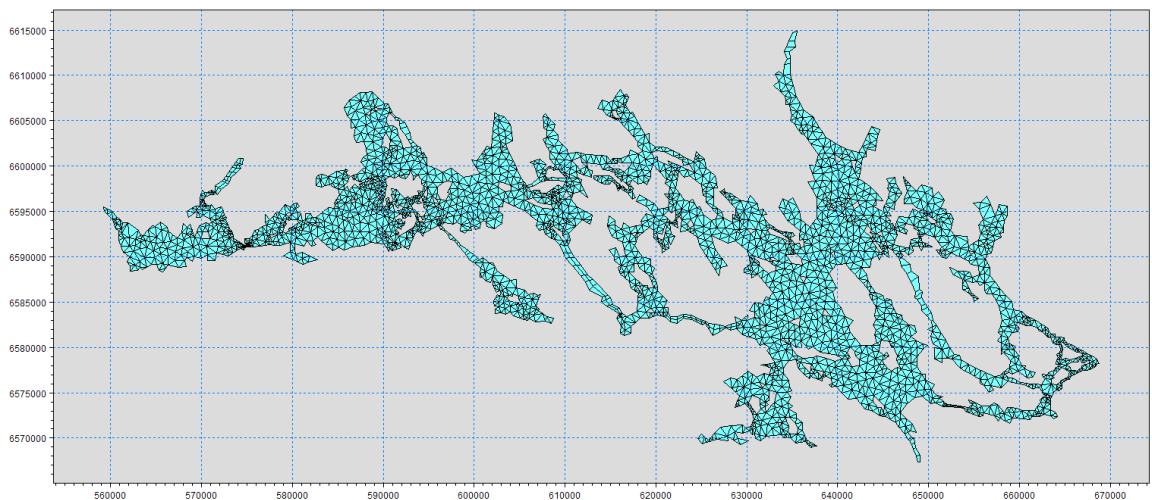
För att modellera de hydrodynamiska förhållandena i Mälaren delas området upp i ett beräkningsnät bestående av ett stort antal celler i form av triangulära och fyrkantiga lådor. I varje sådan beräkningscell löses de hydrodynamiska ekvationerna. Beräkningsnätet definieras utifrån dess geografiska läge, djupet, cellernas storlek och information om ränderna (d.v.s. var strandlinjen går samt var öppna begränsningsytor mot angränsande vattenmassor finns).

Beräkningsnätet för Mälaren sträcker sig från Köping i väst till Stockholm i öst (se Figur 3-1). Modellen av Mälaren begränsas i nordöst av sundet vid Stäket där en öppen rand definierar inflödet. Mot Stockholm slutar modellen väster om centrala staden i sundet mellan Eolshäll och Solviksbadet. Även vid Stockholm begränsas modellen av en öppen rand men till skillnad mot Stäket är randen här bestämd av en tidsvarierande vattennivå (för närmare beskrivning av de öppna ränderna, se avsnitt 3.5.3).

Mälaren är en mycket flikig sjö med både stora öppna områden och grunda trånga sund. Detta innebär mycket varierande rumsskalor vilket motiverar att ett s.k. ostrukturerat beräkningsnät med varierande cellstorlekar används.

Den horisontella upplösningen, d.v.s. den horisontella storleken på beräkningscellerna, måste vara tillräckligt hög (cellerna tillräckligt små) för att kunna lösa upp de intressanta variationerna. I Mälaren är det t.ex. viktigt att kunna reproducera flödet i de trånga sunden på ett realistiskt sätt och då måste den horisontella upplösningen kunna beskriva variationer i tvärsnittsarea och djup i sunden. Samtidigt får inte antalet celler vara så stort att beräkningarna tar för lång tid. Med hänsyn till dessa faktorer delades Mälaren in i ca 4600 horisontella beräkningsceller (se Figur 3-1 samt en förstoring i Appendix 1 i Figur A - 1).

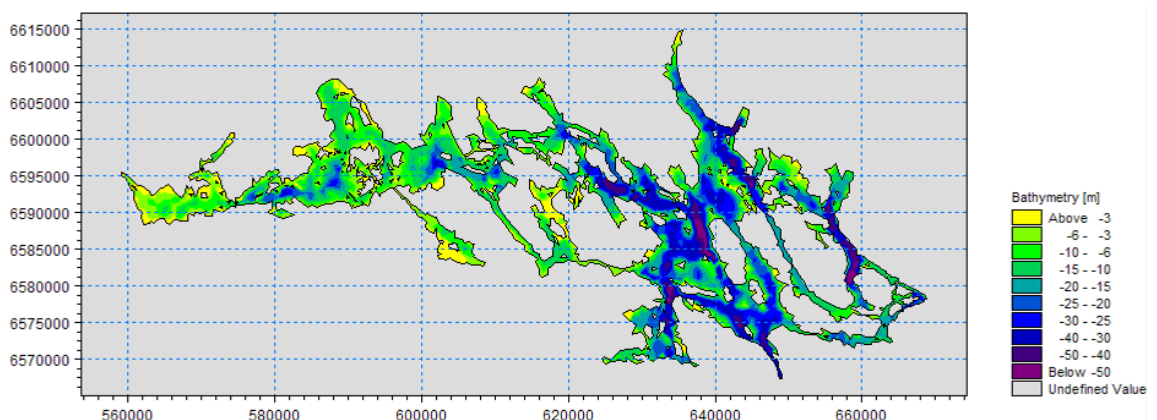
Sista steget är att bestämma den vertikala upplösningen. I Mälaren används 23 vertikala lager. De 12 översta är 1 m tjocka. Sedan följer 3 lager på 2 m och därunder 7 lager på 5 m. Det nedersta lagret är upp till 15 m tjockt. Observera att det sista lagret ovanför botten (vilket det blir beror på botten djupet) anpassar sin tjocklek till det rådande botten djupet. Denna upplösning är tillräcklig för att modellen korrekt ska beskriva t.ex. sommarskiktningen och transporten av djupvatten.



Figur 3-1 Beräkningsnätet för Mälaren. Koordinatsystemet är SWEREF99 (en större figur finns i Appendix 1, Figur A - 1).

3.3 Batymetri

Bottentopografin i modellen över Mälaren bygger dels på Sjöfartsverkets digitaliserade sjökort, tillgängliga via DHI:s programvara MIKE C-Map och dels på högupplösta djupdata (med upplösningen 20 m) som erhållits från Sjöfartsverket. De senare finns enbart för mindre områden i viktiga delar av farlederna. Djupuppgifterna interpoleras till beräkningsnätet så att varje cell får ett värde (se Figur 3-2).



Figur 3-2 Batymetri i Mälarmodellen (en större figur finns i Appendix 2, Figur A - 2). Koordinatsystemet är SWEREF99.

3.4 Initialisering

Att initialisera en modell innebär att starttillståndet definieras, d.v.s. att alla variabler ges ett initialvärde i varje beräkningscell. Den hydrodynamiska modellen MIKE 3 FM kräver att vattenstånd och temperatur initialiseras. Vattenståndet initialiserades med ett konstant värde i hela området lika med 0,12 m då detta var aktuell nivå i Mälaren vid startdatumet (jämfört med en referensnivå på 0 m). Simuleringsperioden börjar när vinterförhållanden råder och vattnet är välomblandat. Temperaturen initialiserades därför till ett konstant värde, 1°C, i hela beräkningsnätet. Strömmen sätts initialt till noll, men ställer relativt snabbt in sig efter drivningen.

3.5 Drivning

För att driva den hydrodynamiska modellen i Mälaren behövs information om

- I. tillflöde av vatten via vattendrag och markavrinning,
- II. de meteorologiska förhållandena,
- III. förhållandena vid de öppna ränderna (Stäket, Stockholm och Södertälje).

3.5.1 Tillflöden

Åtta stora tillflöden finns definierade i modellen, se Tabell 3-2. Flödet i dessa är uppmätt på flera ställen, men aldrig vid mynningarna. Data har laddats ner från SLU:s databas (<http://info1.ma.slu.se/>). Totalflödet till Mälaren från varje avrinningsområde är beräknat genom att multiplicera avrinningen per ytenhet uppströms respektive mätstation med totala ytan för hela avrinningsområdet. Alltså antas att avrinningen per kvadratmeter är lika stor nedströms mätpunkten som uppströms, vilket är en förenkling av verkligheten. I vissa vattendrag har medelvärdet för flera mätstationer använts då mätstationerna har legat i olika biflöden.

Tabell 3-2 Inflöden från större vattendrag i modellen.

Namn	Dataunderlag	Avrinningsområde + närområde km ²	Medelflöde per ytenhet l/(s·km ²)	Medelflöde i modellen + när- området m ³ /s
Eskilstunaån	Flöde från 96,4% av avrinningsområdet	3857 + 74	3,7	14,8 + 0,3
Arbogaån	PULS-data vid mynningen	4134 + 20	9,2	37,9 + 0,2
Kolbäcksån	Flöde från 92,5% av avrinningsområdet	3118 + 122	6,3	20,4 + 0,8
Hedströmmen	Flöde från 95,0% av avrinningsområdet	1050	8,3	8,6
Sagån	Flöde från 90,5% av avrinningsområdet	857 + 35	5,8	5,3 + 0,2
Svartån	Flöde från 93,8% av avrinningsområdet	775 + 156	6,0	4,7 + 0,9
Köpingsån	Flöde från 38,3% av avrinningsområdet	587	5,2	1,5
Räckstaån	Flöde från 82,0% av avrinningsområdet	261 + 22	5,7	1,2 + 0,1

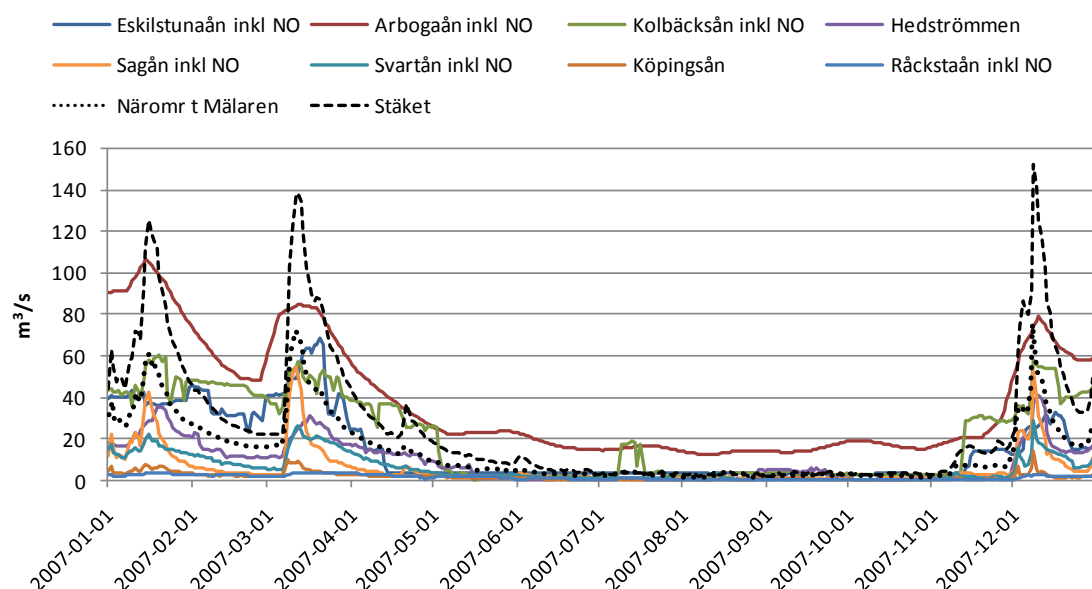
Undantaget är Arbogaån där mätningarna enbart täcker in 46 % av hela avrinningsområdet. Eftersom Arbogaån är det största tillflödet till Mälaren är osäkerheten i ovanstående beräkningsmetod stor. Istället har veckovis modellerade s.k. PULS-data från SMHI (beräknade med HBV-modellen) använts för totalflödet i Arbogaån.

Närmast Mälaren och nedströms avrinningsområdena till de större vattendragen finns ett avrinningsområde som kallas närområdet, som även innefattar öarna i Mälaren. Avrinningen från närområdet rinner antingen in i Mälaren via mindre vattendrag eller som direktavrinning längs stränderna. Enligt SMHI är närområdet 4244 km² och medelflödet från detsamma är 26 m³/s. Avrinningen från närområdet kan alltså jämföras med de största enskilda inflödena till Mälaren (se Tabell 3-2). I modellen har närområdet delats in i mindre områden utifrån vilken vattenförekomst som avrinningen hamnar i, samt en del som rinner in norr om Stäket (utanför modellens nordöstra rand). För närmare beskrivning av inflödet via Stäket, se avsnitt 3.5.3.

Indelningen av närområdet har gjorts med hjälp av Vattenkartan (www.vattenkartan.se) samt Terrängkartan. Om delområdet angränsar till något av de åtta stora vattendragen har ytan adderats till vattendragets avrinningsområde (se ovan och Tabell 3-2).

Om området inte angränsar till något av de stora vattendragens avrinningsområden har ett nytt inlopp till vattenförekomsten skapats. Detta har placerats vid mynningen av lämpligt mindre vattendrag (detta för att minimera risken för orealistiska flödeshastigheter i modellen). Totalt har 17 sådana ”fiktiva” inlopp lagts till i modellen (se Appendix 3, Figur A - 3). Flödet i dessa inlopp har beräknats utifrån medelvärdet av flödet per yta i alla uppmätta stationer i Mälarens avrinningsområde (både i större vattendrag och i mindre vattendrag som ingår i närområdet).

Lokaliseringen av samtliga tillflöden visas i Appendix 3. Flödet i inloppen till Mälaren visas i Figur 3-3. Dessutom tillförs regn över vattenytan, se avsnitt 3.5.2. I modellen uppdateras tillflödena en gång per dygn.

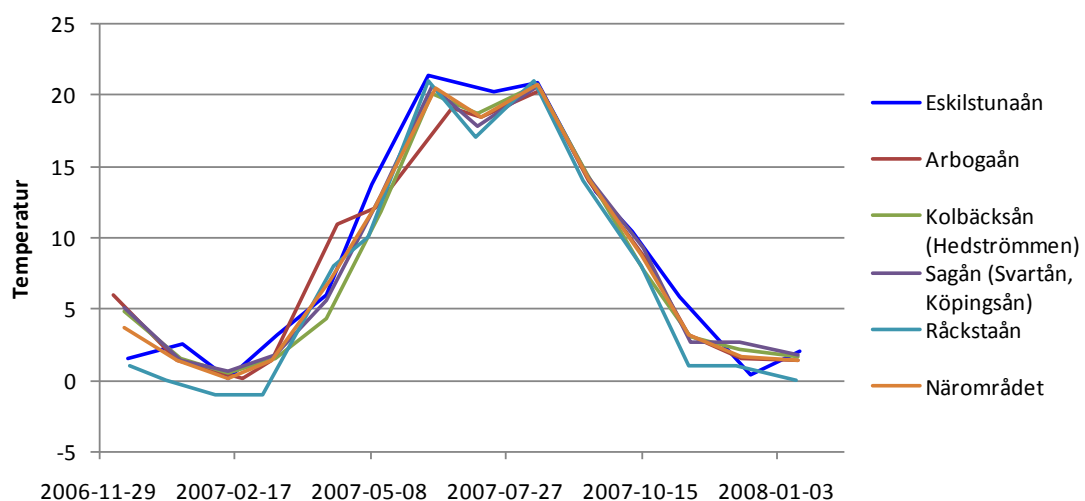


Figur 3-3 Tillflöden till modellen (exklusive regn). NO = avrinning från närområdet. Avrinningen från närområdet som inte lagts till de större vattendragen har summerats i ”Näromr t Mälaren”. Flödet in via Stäket beskrivs i avsnitt 3.5.3.

Tabell 3-3 Underlag för vattentemperaturen i tillflödena.

Namn	Mätningar	Approximation
Eskilstunaån	1 gång/mån	-
Arbogaån	varannan mån	Månader då mätdata saknas samma som närområdet
Kolbäcksån	1 gång/mån	-
Hedströmmen	Saknas	Samma som Kolbäcksån
Sagån	1 gång/mån	-
Svartån	Saknas	Samma som Sagån
Köpingsån	Saknas	Samma som Sagån
Råckstaån	1 gång/mån	-
Närområdet	Saknas	Medelvärde av samtliga mätningar

För att värmebalansen i Mälaren ska kunna beräknas så korrekt som möjligt anges en temperatur på vattnet i tillflödena. I vissa vattendrag finns temperaturmätningar från SLU medan de saknas i andra. I vattendrag där mätningar saknas har temperaturen approximerats till uppmätt temperatur i vattendrag med avrinningsområde med ungefär samma nord/sydliga utsträckning. Tillgången på mätdata samt hur temperaturen har approximeras beskrivs i Tabell 3-3 och temperaturerna visas i Figur 3-4.



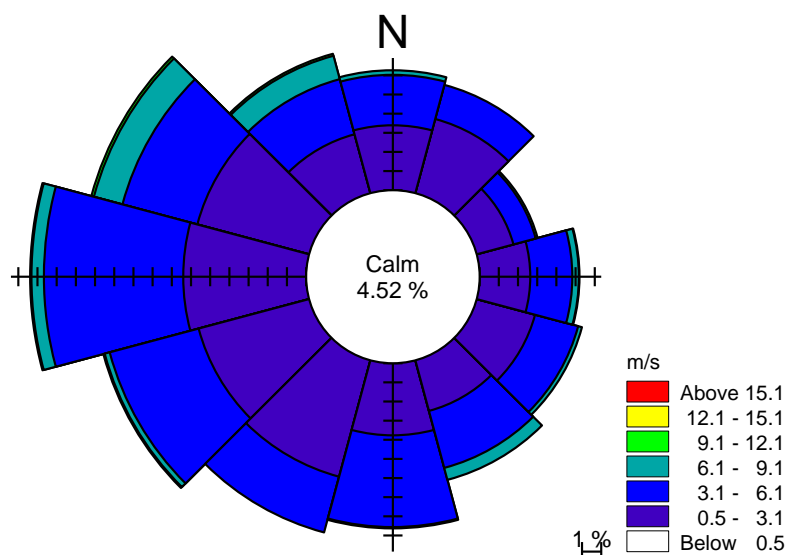
Figur 3-4 Vattentemperaturen i tillflödena till Mälaren.

3.5.2 Meteorologisk drivning

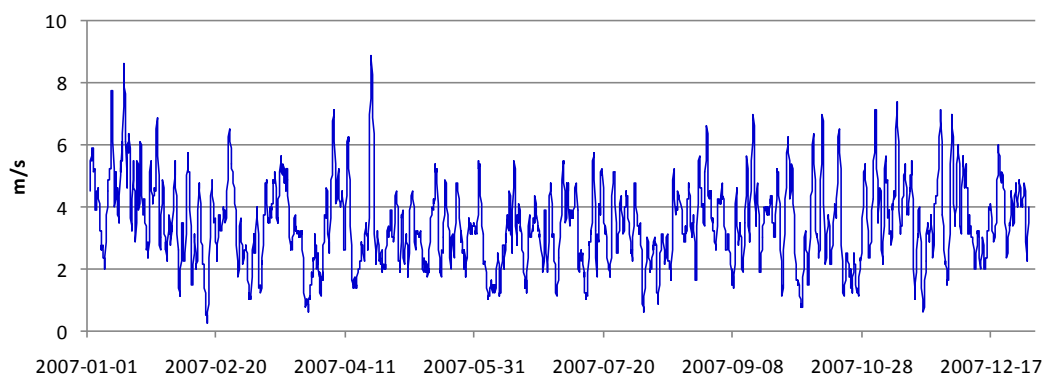
För att bestämma den meteorologiska drivningen behövs information om vinden, nederbörden och värmeutbytet mellan vattnet och atmosfären. Förutom de tidsvarierande parametrarna vind, lufttemperatur, nederbörd och relativ luftfuktighet (se nedan), har även medelmolnigheten används för att kalibrera den inbyggda solinstrålningsfunktionen i MIKE 3 FM. Enligt SMHI är årsmedelvärdet för molnigheten 65 % i Mälärregionen.

Vind

Vindens hastighet och riktning är den viktigaste meteorologiska parametern när det gäller strömningen i Mälaren. Vinddata har erhållits från SMHI:s mätstation på Adelsö med en tidsupplösning på tre timmar. En vindros som visar fördelningen av vindhastigheter över olika vindriktningar visas i Figur 3-5. Vindar från väst dominerar och kraftiga vindar blåser vanligen från nordväst. Vindhastigheten (dygnsmedel) under 2007 visas i Figur 3-6. Medelvindhastighet under 2007 var 3,5 m/s och maxhastigheten var 12 m/s. Vindhastigheterna fördelar sig relativt jämt över året förutom januari som var något blåsigare än resten av året (medelvindhastigheten 4,5 m/s).



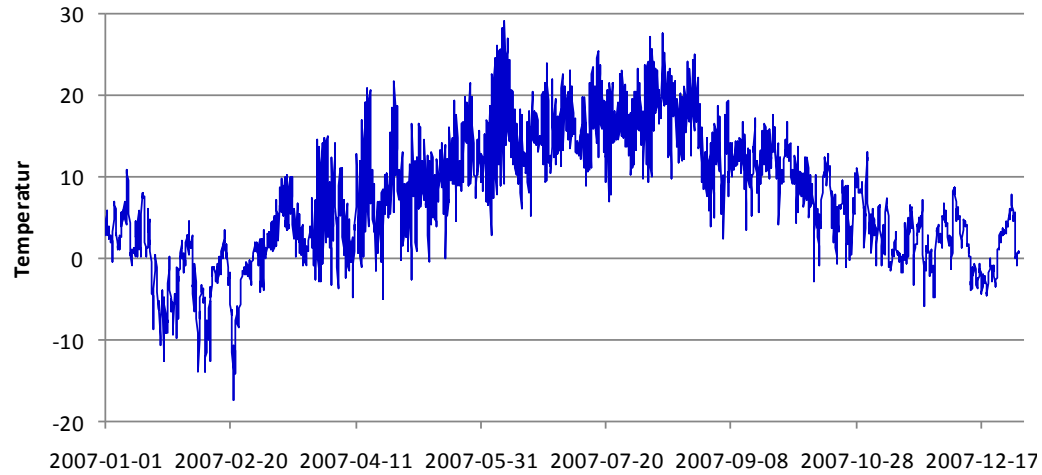
Figur 3-5 Vindros från Adelsö 2007. Data från SMHI. (Calm = vindstilla)



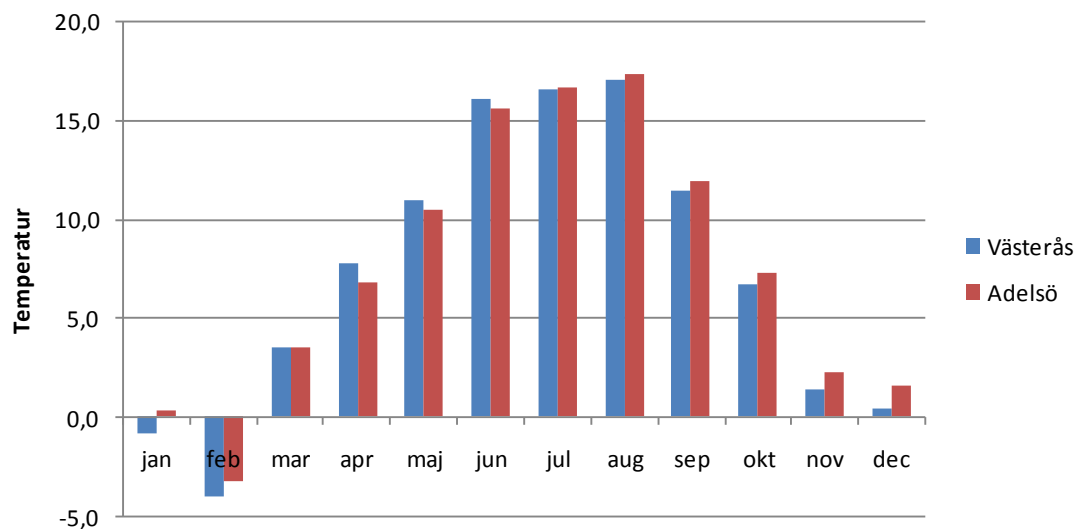
Figur 3-6 Vindhastighet från Adelsö 2007, dygnsmedel. Data från SMHI.

Lufttemperatur

Lufttemperaturen används i modellen som indata till beräkningarna av värmeflödet genom vattenytan. Lufttemperaturen påverkar således temperaturskiktningen i sjön. Lufttemperaturdata har liksom övriga meteorologiska parametrar erhållits från SMHI:s mätstation på Adelsö, med en tidsupplösning på tre timmar (se Figur 3-7).



Figur 3-7 Temperatur var tredje timme från Adelsö 2007. Data från SMHI.

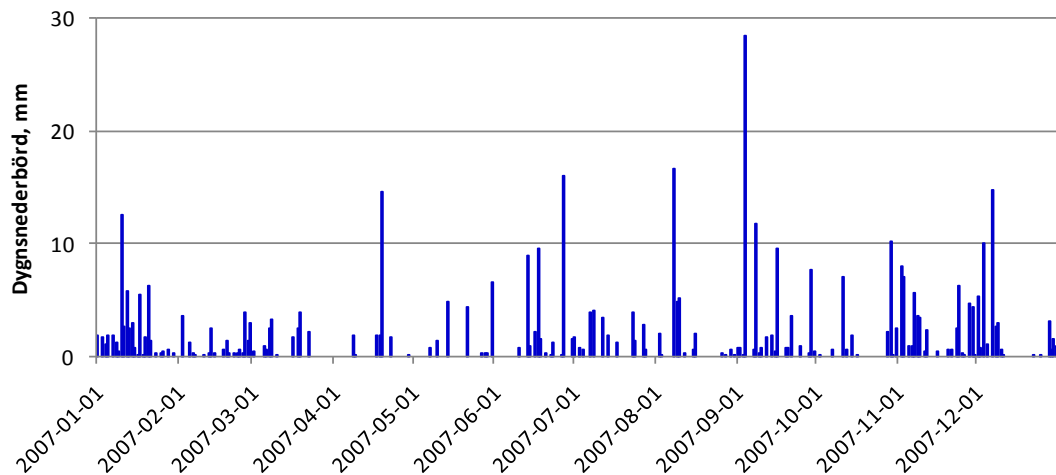


Figur 3-8 Månadsmedeltemperatur i Västerås och på Adelsö 2007. Data från SMHI.

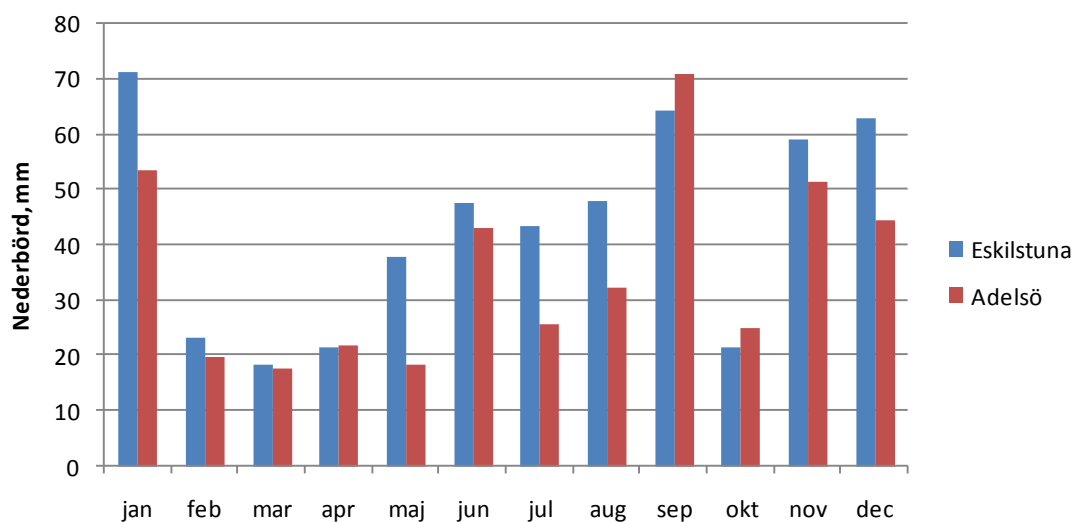
För att undersöka temperaturens variation över Mälaren, d.v.s. hur representativ lufttemperaturen som är uppmätt på Adelsö (östra Mälaren) är för hela Mälaren, jämfördes mätdata med lufttemperaturen i Västerås (västra Mälaren). Resultatet visas som månadsmedelvärden i Figur 3-8. Höst- och vintertemperaturen är lägre i Västerås medan vår- och försommartemperaturen är lägre i Adelsö, vilket var väntat utifrån stationernas avstånd från havet. Skillnaderna är dock små och temperaturerna uppmätta vid Adelsö kan användas som en approximation för lufttemperaturen över hela Mälaren.

Nederbörd

Dygnsnederbörden över sjön räknas in i modellen och påverkar massbalansen. Dygnsnederbörden från Adelsö visas i Figur 3-9. Nederbörden jämfördes med nederbörds-
mängden i Eskilstuna (västra Mälaren), se Figur 3-10. Generellt är nederbörds-
mängderna något högre i Eskilstuna, där årsnederbörden är 95 mm mer än vid Adelsö. Nederbördsdata från Adelsö har trots detta använts över hela Mälaren i modellen. Då
det direkta tillskottet av regnvatten på ytan är litet i förhållande till tillflödena via vat-
tendragen, och därför endast marginellt påverkar massbalansen för Mälaren, anses den-
na approximation tillräckligt god.



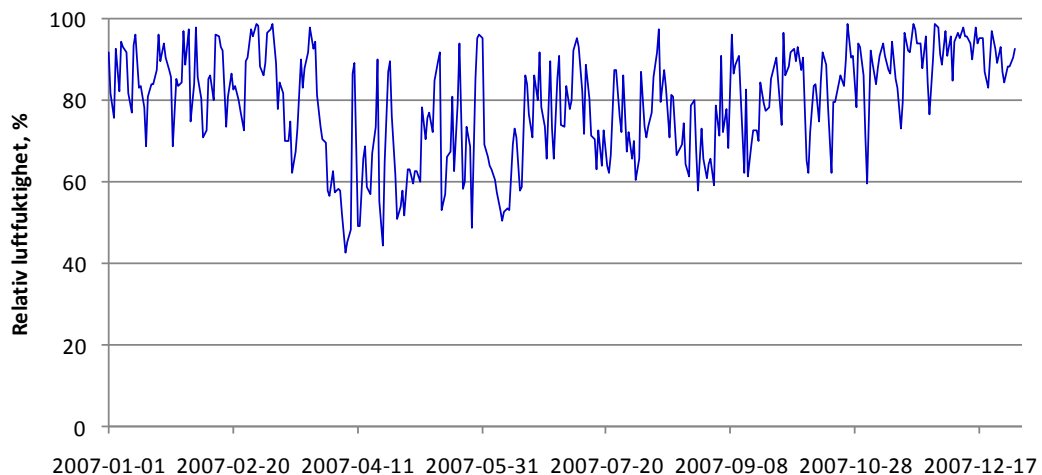
Figur 3-9 Dygnsnederbörd från Adelsö 2007. Data från SMHI.



Figur 3-10 Månadsnederbörd i Eskilstuna och på Adelsö 2007. Data från SMHI.

Relativ luftfuktighet

I modellen påverkas avkylningen av avdunstningen vilken beräknas utifrån uppmätt
luftfuktighet och vindhastighet. Dygnsvärden för den relativa luftfuktigheten från Adel-
sö (SMHI) har använts i modellen, se Figur 3-11.



Figur 3-11 Relativ luftfuktighet per dygn från Adelsö 2007. Data från SMHI.

3.5.3 Randvillkor

På de ställena där modellområdet begränsas av en öppen rand, d.v.s. en öppen gräns mot ett intilliggande vattenområde, måste värden för modellens samtliga variabler anges på randen. För modellen över Mälaren är de öppna ränderna Stäket, Stockholm och Södertälje Sluss. För beräkningarna av strömmarna anges antingen flödet genom eller vattenståndet vid randen. För värmebalansberäkningarna anges temperaturen på randen.

I Stäket anges flödet och temperaturen. I Stockholm anges vattennivån och att temperaturen är lika med den i vattnet precis innanför modellgränsen (d.v.s. ingen variation över randen). I Södertälje anges flödet och att temperaturen är lika med den i vattnet vid modellgränsen. Så länge flödet i Stockholm och Södertälje är riktat ut ur modellen påverkar inte den ansatta temperaturen på randen hur temperaturen utvecklas inne i modellen.

Stäket

Flödet in via den öppna randen är summan av flödena från Fyrisån, Örsundaån, Oxundaån, Sävaån samt den del av närområdet som är beläget uppströms Stäket (se Tabell 3-4). Cirka 60 % av flödet från avrinningsområdet exklusive närområdet passerar någon av mätstationerna. Närområdet, vars flöde är en approximation då mätningar saknas, utgör en fjärdedel av avrinningsområdet. Inflödet genom Stäket är därför något osäkert.

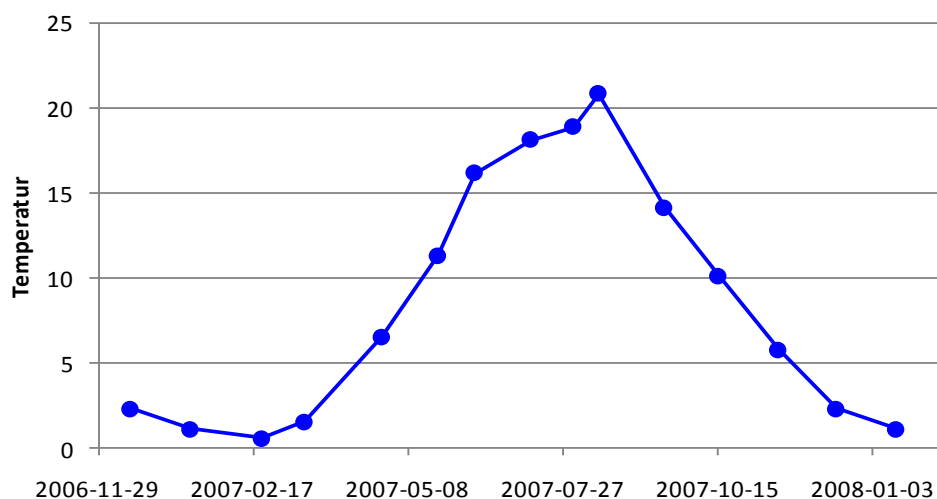
Eftersom randen vid Stäket representerar ett inflöde anges här också en temperatur i modellen. Det finns uppmätta temperaturer i Stäket från 0,5 m djup 1968-2000 och på 4 m djup 1968-1995 (SLU). Det finns alltså inga temperaturmätningar gjorda vid Stäket under simuleringsperioden 2007.

Temperaturen på 0,5 och 4 m djup skiljer sig väldigt lite från varandra och det kan därför antas att temperaturen är relativt konstant över djupet i Stäket.

I Skarven (uppströms Stäket) finns temperaturmätningar från 2007 på djupen 0,5 m, 10 m, 15 m, 20 m, 25 m och 30 m. Under de år som temperaturen mätts både i Skarven och i Stäket är temperaturen väldigt lika på djupet 0,5 m på de båda stationerna. Temperaturen på randen vid Stäket har därför satts till de uppmätta värdena på 0,5 m djup i Skarven. Dock saknades temperaturmätningar från januari, oktober, november och december, vilka istället ersattes av medeltemperaturen för dessa månader under hela mätperioden i Stäket. Den slutliga temperaturen på randen visas i Figur 3-12.

Tabell 3-4 Underlag för inflödet via Stäket.

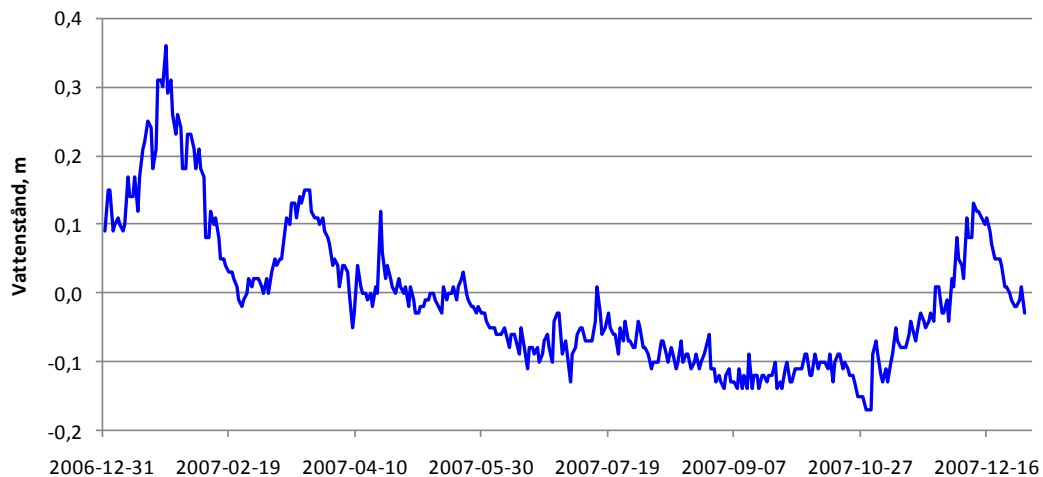
Namn	Dataunderlag	Avrinningsområde km ²	Medelflöde per area l/(s·km ²)	Medelflöde i modellen m ³ /s
Fyrisån	Flöde från 97,9% av avrinningsområdet	2006	5,8	12,2
Örsundaån	Flöde från 42,4% av avrinningsområdet	736	6,3	4,6
Oxundaån	Flöde från 21,7% av avrinningsområdet	272	5,1	1,4
Sävaån	Flöde från 98,5% av avrinningsområdet	200	6,2	1,2
Närområdet	Medelflöde från alla mätstationer	1063	6,4	6,8



Figur 3-12 Temperatur (°C) på randen vid Stäket. Baserad på data från SLU av uppmätta temperaturer i Stäket och Skarven.

Stockholm

I modellen är vattennivån på randen vid Stockholm satt till nivån i Hammarbysslussen (se Figur 3-13). Nivåerna är omräknade så att referensnivån i modellen är 0 m istället för att följa Mälarens höjdsystem. Egentligen är allt flöde ut ur Stockholm reglerat via slussar och kulvertar men randen behandlas ändå som en öppen rand som är nivåbestämmd i modellen. Anledningen till detta är att små fel i massbalansen kan leda till en inkorrekt nivåbeskrivning i hela sjön om inte någon av ränderna är nivåbestämmd. Detta medför att då alla slussar i verkligheten är stängda sker ändå ett visst flöde över randen i modellen, dock med ett nettoflöde kring 0 m³/s.

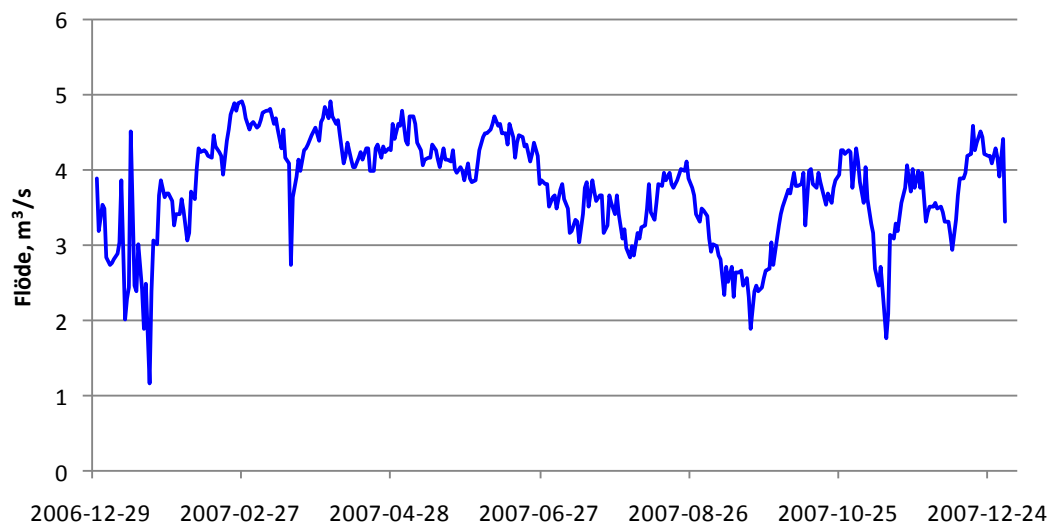


Figur 3-13 Vattenstånd (m) i Stockholm. Referensnivån är 0 m i modellen. Data från SMHI.

Temperaturen på Stockholmsranden sätts lika med vattentemperaturen i modellen precis innanför randen. Detta innebär att ingen värme transporteras över Stockholmsranden på grund av diffusivt utbyte. Temperaturen på randen påverkar därmed inte temperaturen inne i Mälaren så länge vattenflödet är riktat ut ur Mälaren.

Södertälje Sluss

I Södertälje är flödet över randen specificerat. Detta flöde är summan av det uppmätta flödet genom Södertälje Sluss och kulvert, se Figur 3-14.



Figur 3-14 Flöde (m^3/s) genom Södertälje Sluss. Data från SMHI.

Temperaturen på Södertäljeranden sätts liksom Stockholmsranden till vattentemperaturen strax innanför randen och påverkar därmed inte värmebalansen i Mälaren så länge flödet är riktat ut ur Mälaren.

3.5.4 Is

I modellen över Mälaren anges den period under vilken sjön är istäckt. Modellen behandlar isen som ett ”lock” så att utbytet med atmosfären upphör. Isens temperatur är 0 °C.

Endast enstaka uppgifter på isläggning respektive islossning för Mälaren finns lagrade (SMHI). Medeldatum för isläggning/islossning för SMHI:s mätstationer presenteras i

Tabell 3-5.

Ingen av mätstationerna för isläggning/islossning ligger i något av de större öppna vattenområdena, vilka troligtvis har en kortare istäckt period än mätstationerna. Det senaste medeldatumet för isläggning på någon av stationerna är 8 januari (Svinsundet) och det tidigaste datumet för islossning på någon av stationerna är 25 mars (Svinsundet). Det troligaste är att större delen av Mälaren har en kortare istäckt period. Den istäckta perioden i modellen har därför satts mellan 15 januari och 15 mars.

Tabell 3-5 Medeldatum för isläggning och islossning i Mälaren (SMHI).

Station	Medeldatum		Platsens karaktär
	Isläggning	Islossning	
Ulvhällsfjärden	12 december	16 april	Skyddad fjärd
Svinsundet	8 januari	25 mars	Smalt sund
Kyrkfjärden	13 januari	4 april	Smal fjärd
Svartsjövikén	12 december	7 april	Skyddad vik
Skarven ¹	19 december	14 april	Fjärd
Garnsviken ¹	1 december	12 april	Skyddad vik

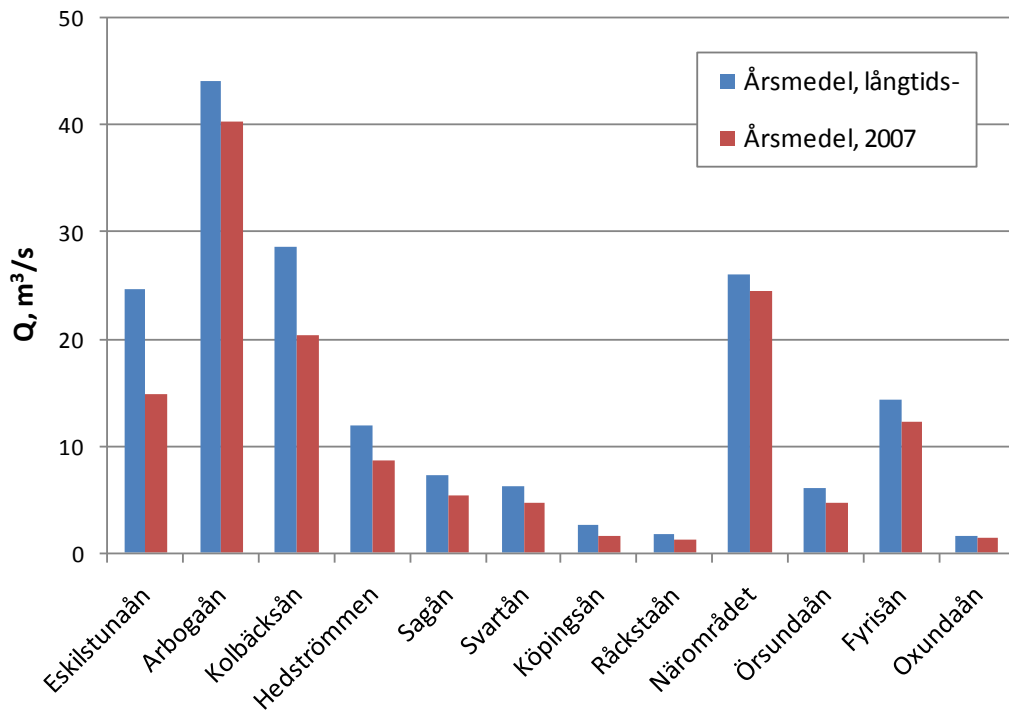
¹Norr om Stäket, utanför modellområdet

3.5.5 Val av simuleringsperiod

För att få med årstidsvariationer och olika kombinationer av vindstyrka, vindriktning och tillflöden har ett helt år simulerats i modellen. År 2007 har valts ut då tillgången på mätdata för drivning av modellen var relativt god detta år.

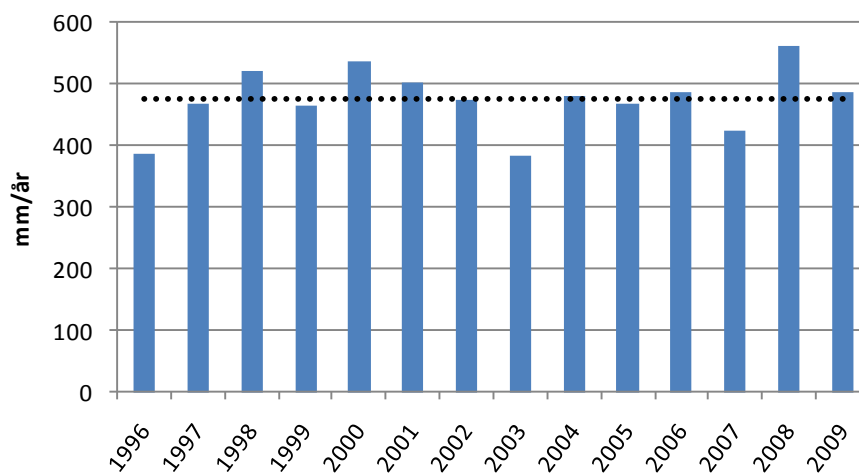
Drivdata för det valda året jämförs här med medelvärden för en längre period för att på ett korrekt sätt kunna tolka och använda resultaten från modellen. Alla meteorologiska data avser mätstationen på Adelsö.

Flödena i vattendragen var lägre 2007 än långtidsmedelvärdet (se Figur 3-15). Flödet i respektive vattendrag jämfört med långtidsmedelvärdena var i medel 76 %.

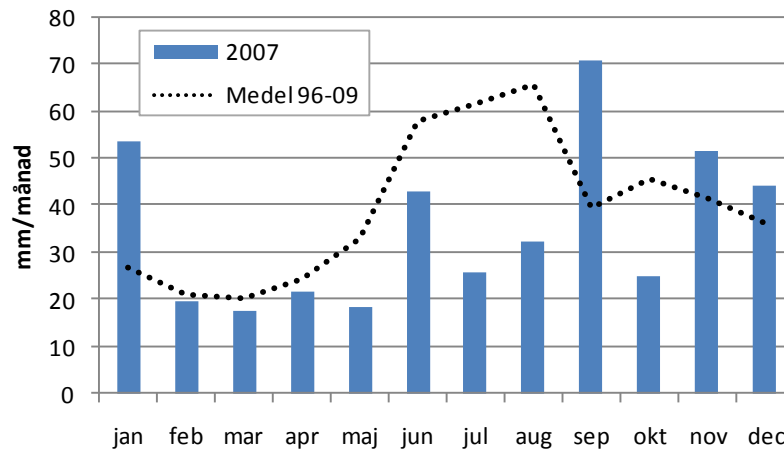


Figur 3-15 Årsmedelflöden 2007 jämfört med långtidsmedelvärden (data från SMHI).

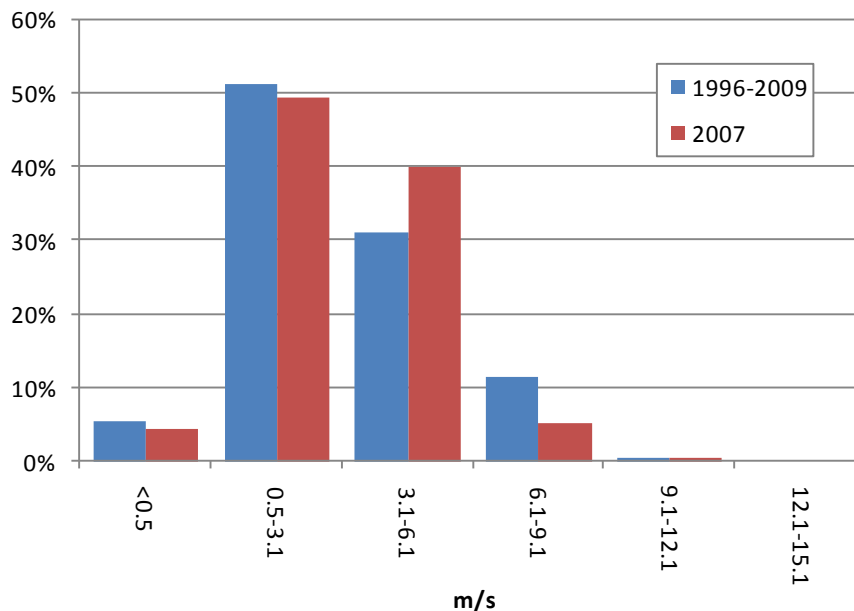
De lägre tillflödena är en följd av att nederbörden under 2007 var något lägre än normalt (se Figur 3-16 och Figur 3-17). I januari, september, november och december var dock nederbörden högre år 2007 än för medelvärdesperioden.



Figur 3-16 Årsnederbörd 1996-2009 (data från SMHI). Streckad linje är medel för perioden.



Figur 3-17 Månadsnederbörd 2007 jämfört med månadsmedelvärden för 1996-2009 (data från SMHI).

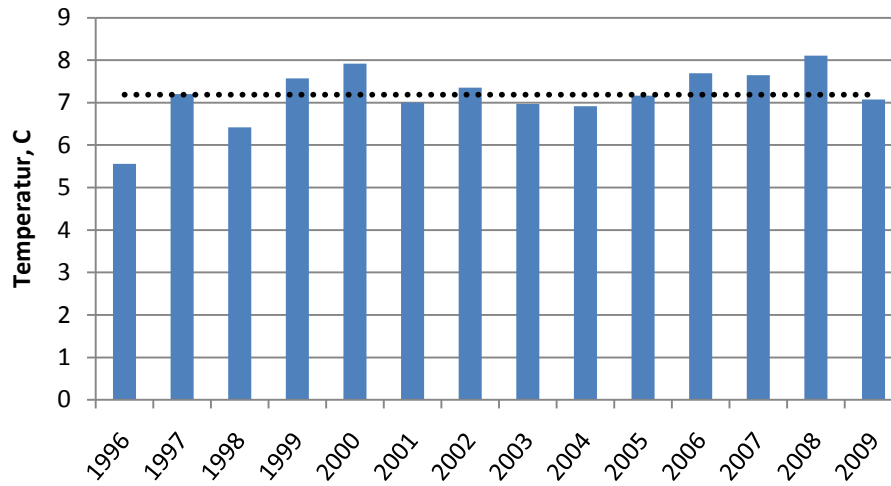


Figur 3-18 Frekvensfördelning av vindhastigheter 2007 jämfört med 1996-2009 (data från SMHI).

Vindhastigheterna var 2007 i stort sett normala jämfört med perioden 1996-2009, om än något mer samlade kring medelvärdet på 3,5 m/s och med färre höga respektive låga vindhastigheter (se Figur 3-18). Även en analys av vindhastigheternas fördelning över olika vindriktningar visar att 2007 var ett normalt år jämfört med perioden 1996-2009.

Årsmedeltemperaturen 2007 var något över normal (se Figur 3-19).

Sammanfattningsvis var 2007 mycket likt ett normalår förutom att det var lite torrare, framför allt på sommaren.



Figur 3-19 Årsmedeltemperaturer 1996-2009 (data från SMHI). Streckad linje är medel för perioden.

4 Resultat

4.1 Jämförelser med mätdata

För att verifiera att modellen över Mälaren ger resultat som stämmer med verkligheten har resultaten jämförts med tillgängliga mätdata. Tyvärr finns inga strömmätningar att jämföra med. Istället har beräknad vattentemperatur i modellen jämförts med uppmätta temperaturprofiler i nio punkter, vilket framför allt visar om blandningen samt värmeutbytet med atmosfären beräknats på ett korrekt sätt. Eftersom den öppna randen i Stockholm har definierats utifrån vattennivån kan modellerat flöde över randen jämföras med uppmätta värden. Dessutom jämförs vattennivån med uppmätta nivåer i två punkter, vilket visar hur väl modellen reproducerar nettovolymstransporten mellan olika delar av Mälaren.

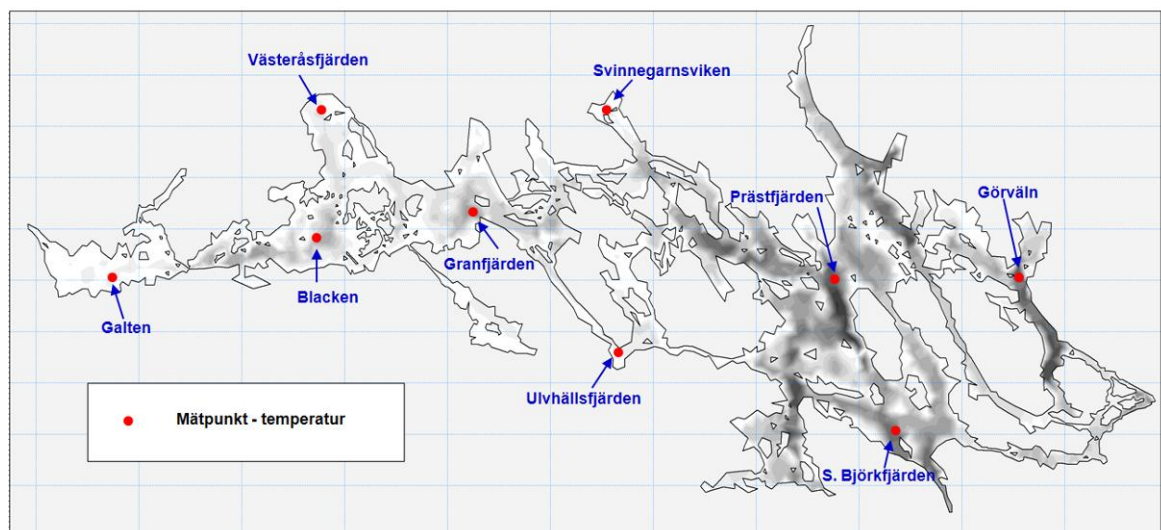
4.1.1 Temperatur

I Mälaren har temperaturen mätts på nio platser och på två till tre djup på varje plats (se Figur 4-1). Data har hämtats från SLU:s databas.

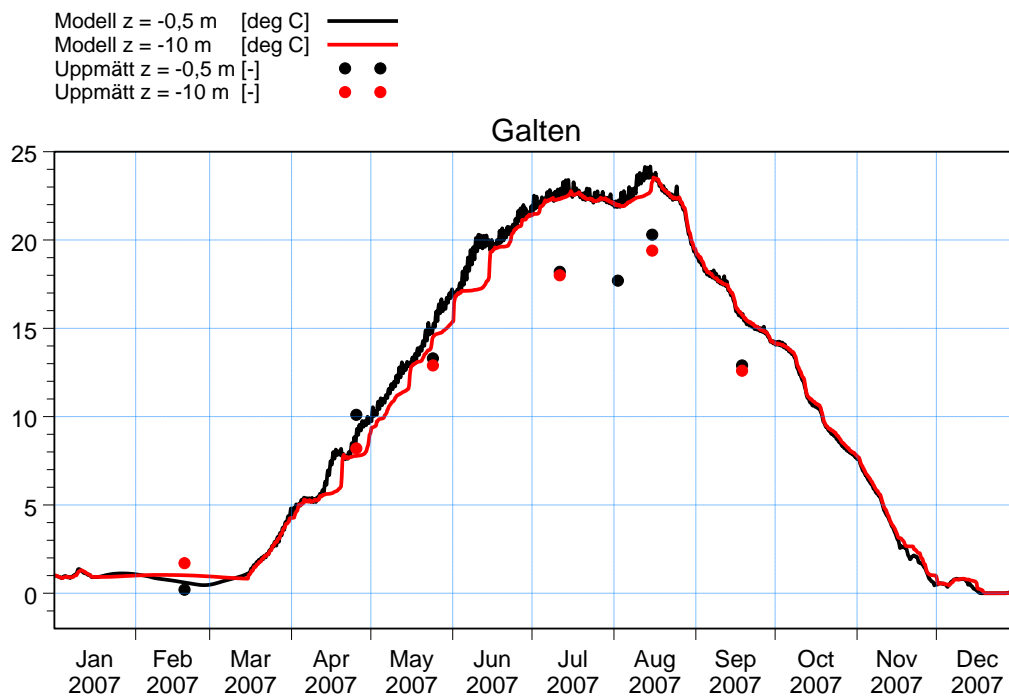
I Figur 4-2–Figur 4-10 visas modellerad och uppmätt temperatur på samma djup i mät-punkterna (från väst till öst).

Resultaten från modellen stämmer tillräckligt väl överens med mätdata i alla mät-punkter, på alla djup och för de flesta säsonger. Modellen överskattar dock genomgående hösttemperaturen och till viss del även sommartemperaturerna. Allmänt är överens-stämmelsen bättre i östra Mälaren än i västra Mälaren, vilket eventuellt beror på att modellen drivs med meteorologiska data uppmätta i östra Mälaren (Adelsö).

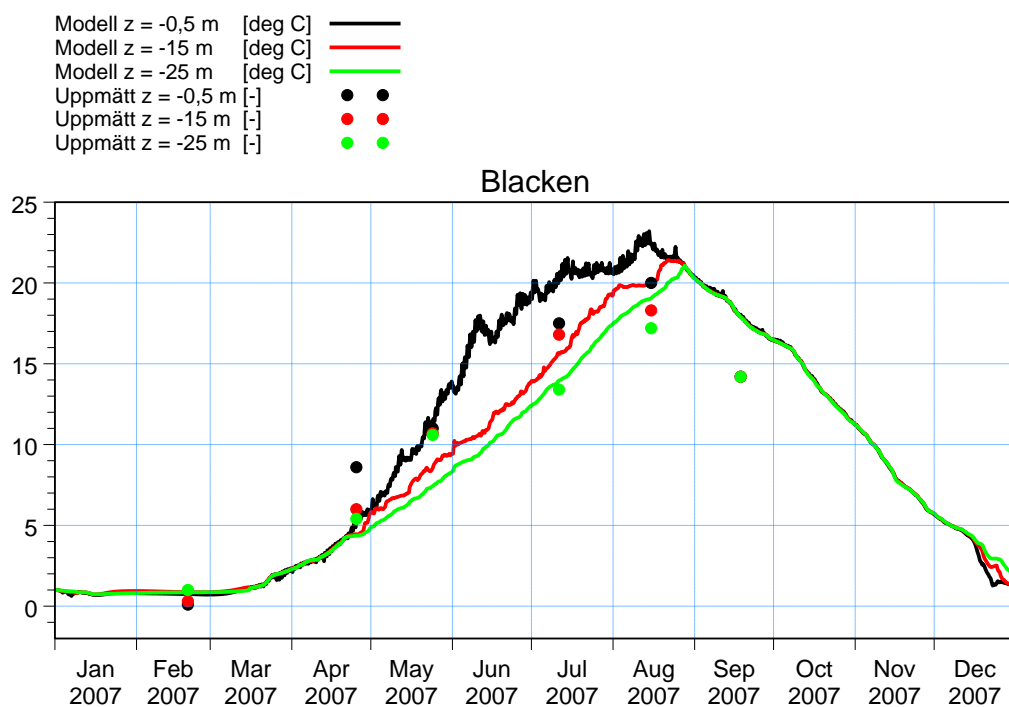
Även skiktningen beskrivs i huvudsak realistiskt, med undantag för Södra Björkfjärden där sommartermoklinen (temperatursprångskiktet på sommaren) nått under 15 m i mätningarna men inte i modellen.



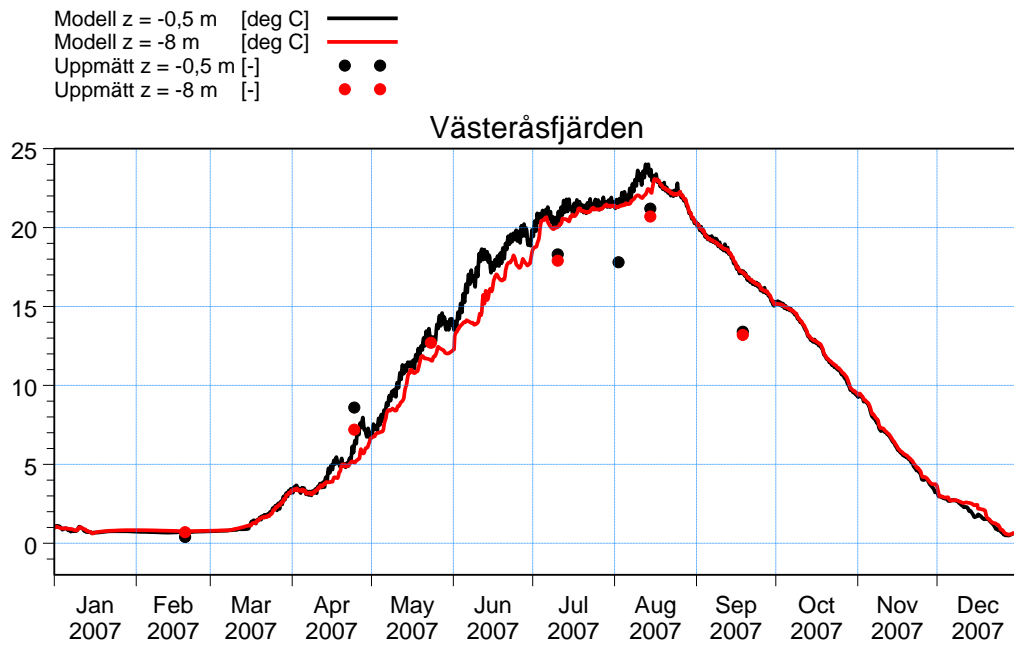
Figur 4-1 Mätpunkter för temperatur i Mälaren (SLU). I samma punkter har modellresultat extrahe-rats.



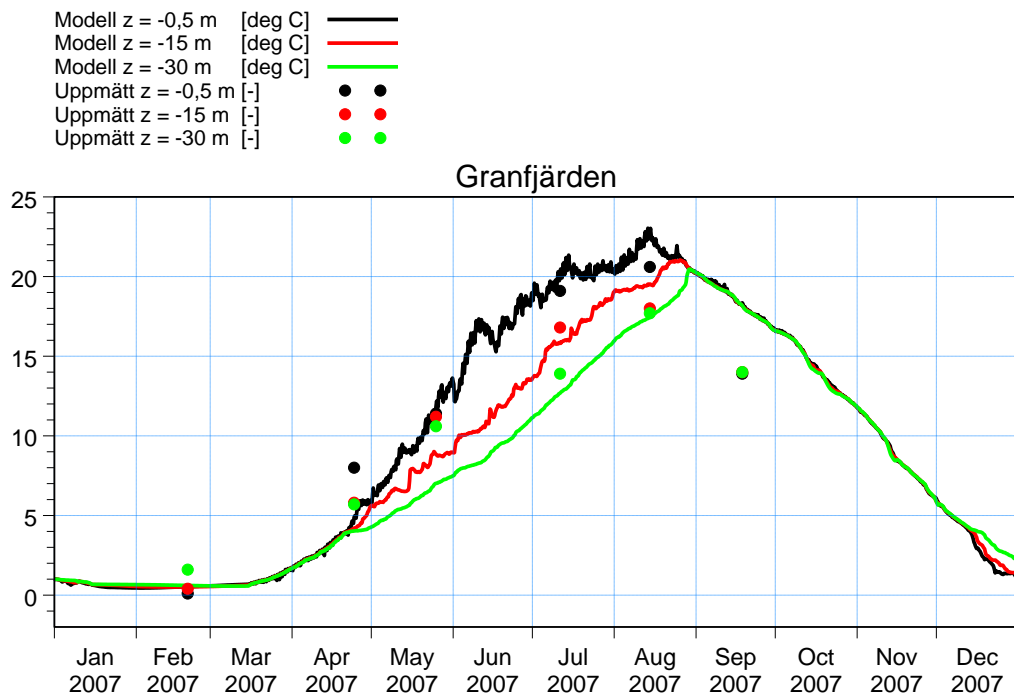
Figur 4-2 Uppmätt (SLU) och modellerad temperatur i Galten.



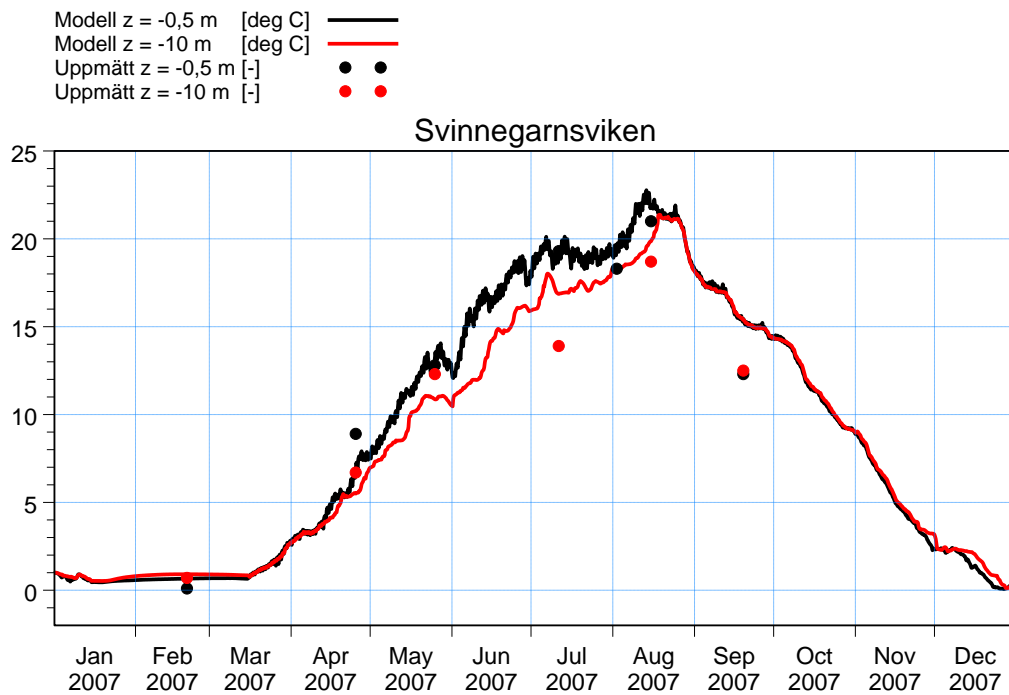
Figur 4-3 Uppmätt (SLU) och modellerad temperatur i Blacken.



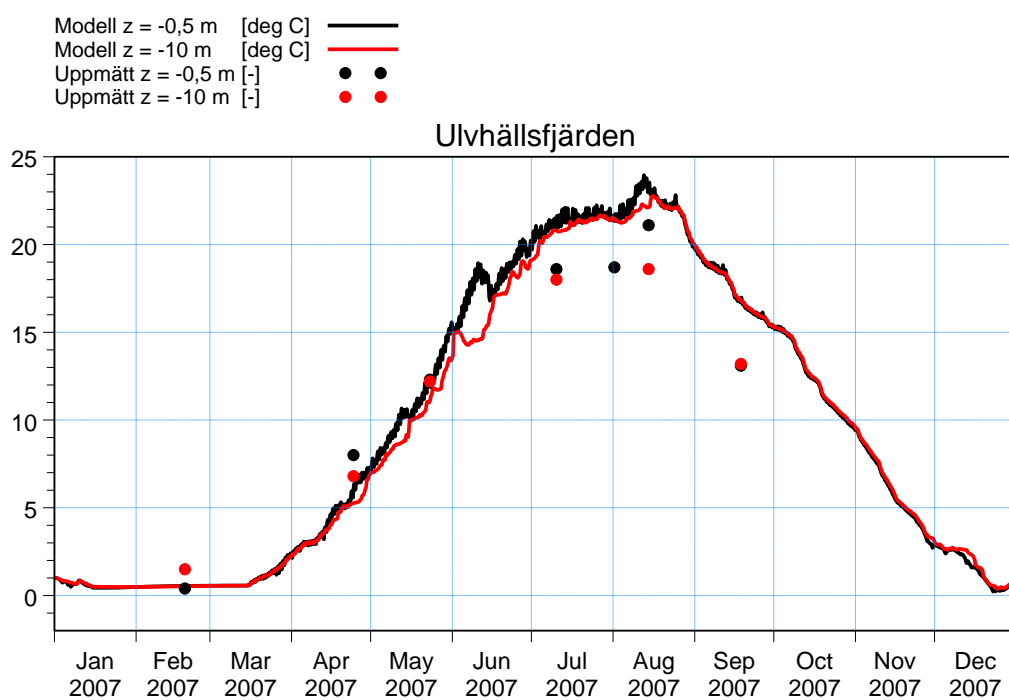
Figur 4-4 Uppmätt (SLU) och modellerad temperatur i Västeråsfjärden.



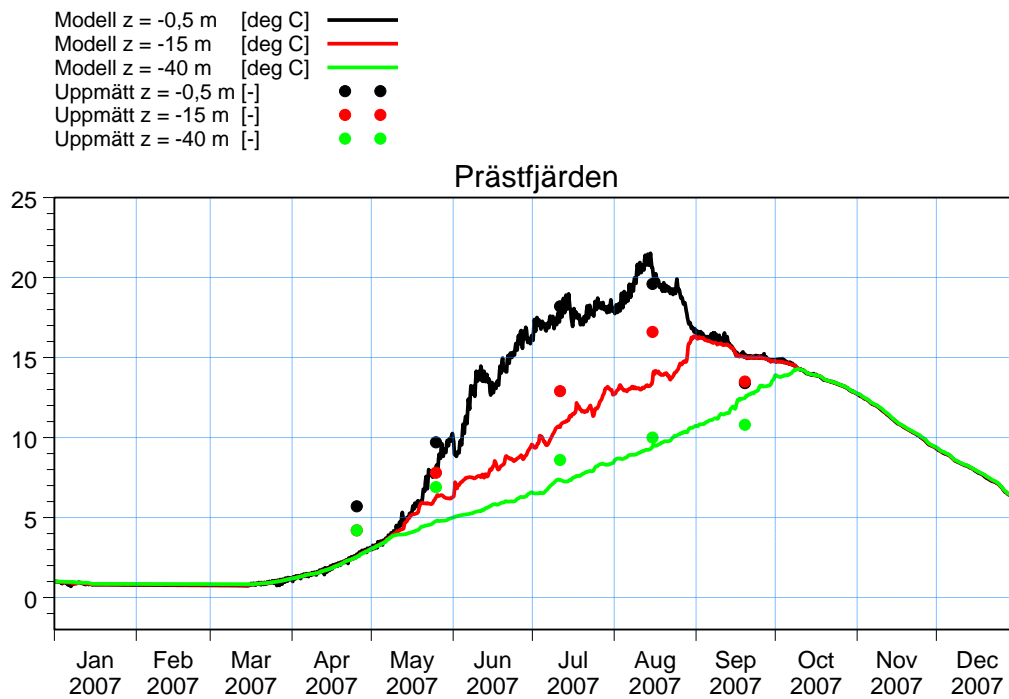
Figur 4-5 Uppmätt (SLU) och modellerad temperatur i Granfjärden.



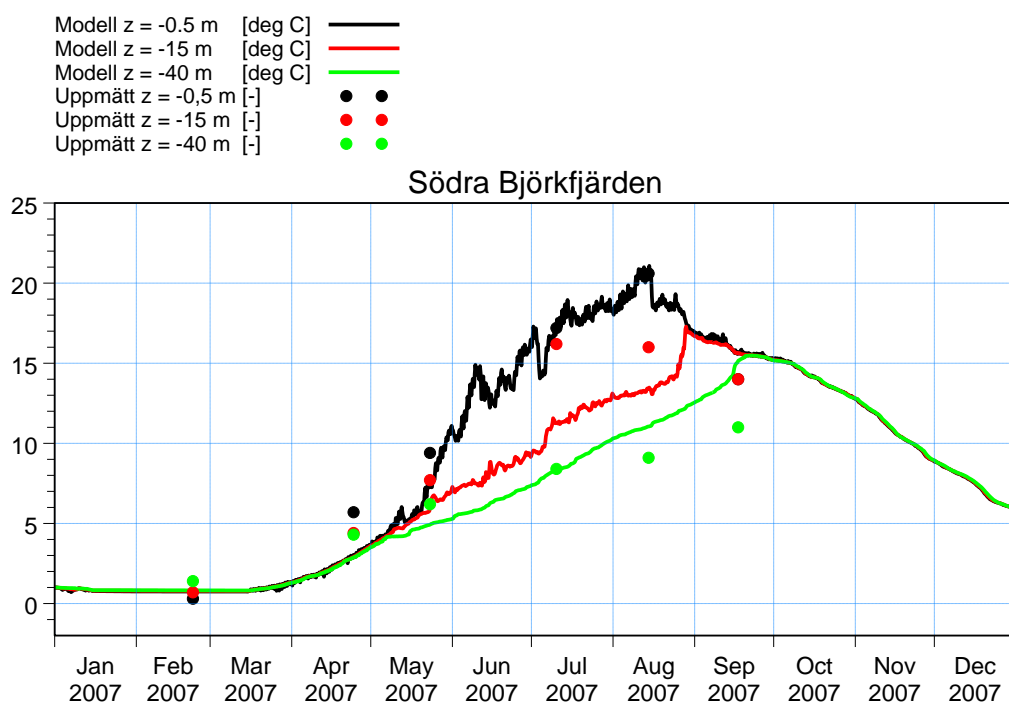
Figur 4-6 Uppmätt (SLU) och modellerad temperatur i Svinnegarnsviken.



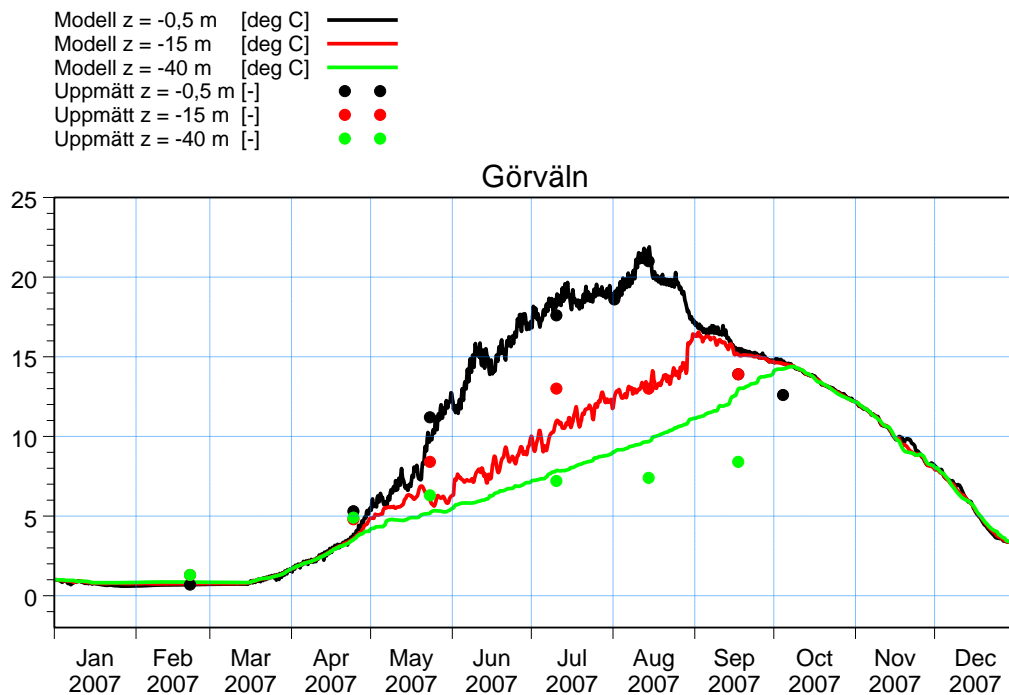
Figur 4-7 Uppmätt (SLU) och modellerad temperatur i Ulvhällsfjärden.



Figur 4-8 Uppmätt (SLU) och modellerad temperatur i Prästfjärden.



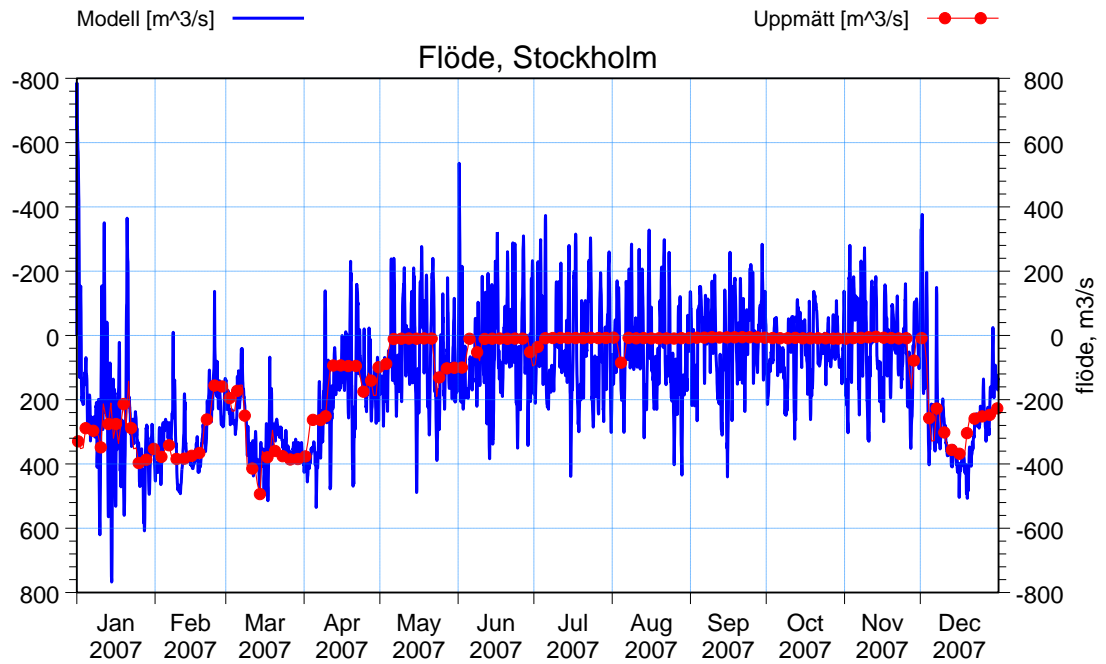
Figur 4-9 Uppmätt (SLU) och modellerad temperatur i Södra Björkfjärden.



Figur 4-10 Uppmätt (SLU) och modellerad temperatur i Görväln.

4.1.2 Utflöde i Stockholm

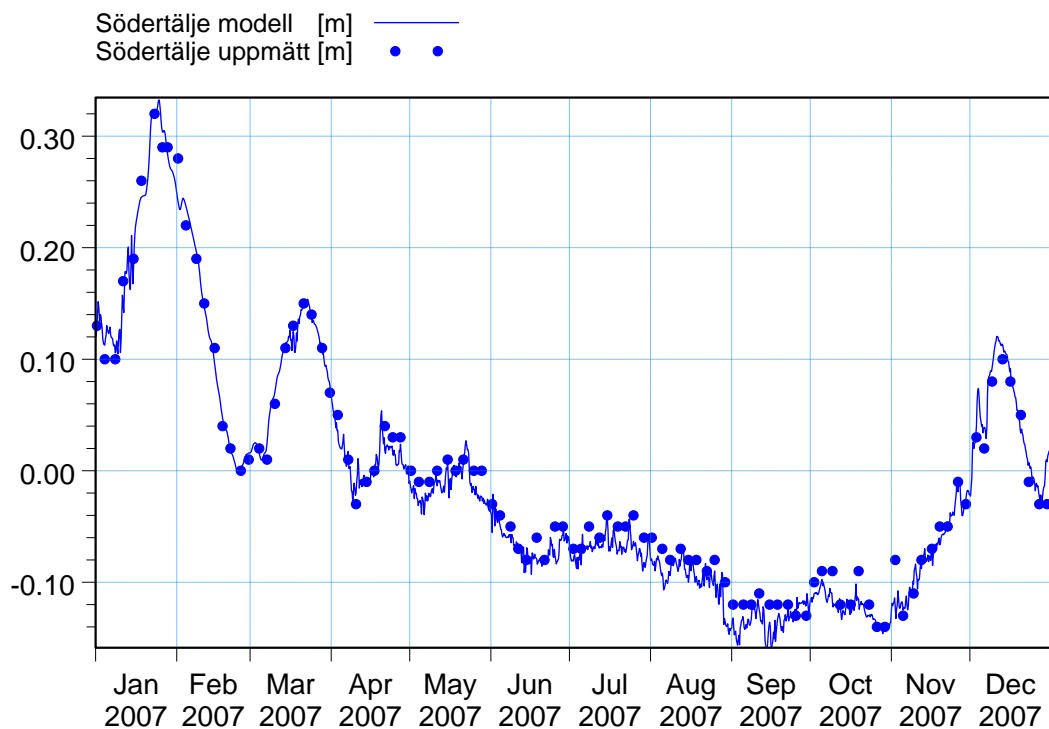
I Figur 4-11 jämförs modellerat flöde över den öppna randen vid Stockholm med uppmätt flöde. Det uppmätta flödet är summan av flödena vid Riksbron, Stallkanalen, Karl Johan-slussen (avtappningskanal, kulvert och sluss), Skanstull (kulvert) samt Hammarbyslussen. Definitionen av modellens flöde stämmer dock inte helt med definitionen av det uppmätta flödet vilket gör att modellen inte i detalj bör jämföras med uppmätt flöde. Randen i modellen är lokaliserad till ett sund väster om stadskärnan (se avsnitt 3.5.3) och inte vid de slussar och kulvertar som reglerar flödet ut genom Stockholm. Framför allt skiljer sig modellens rand från verkligheten genom att det ständigt sker ett visst flöde över randen medan slussarna och kulvertarna i Stockholm kan vara helt stängda. Med den bakgrunden stämmer flödet över modellranden väl med uppmätta data, särskilt för de perioder då det uppmätta flödet skiljer sig från noll (januari-april samt december).



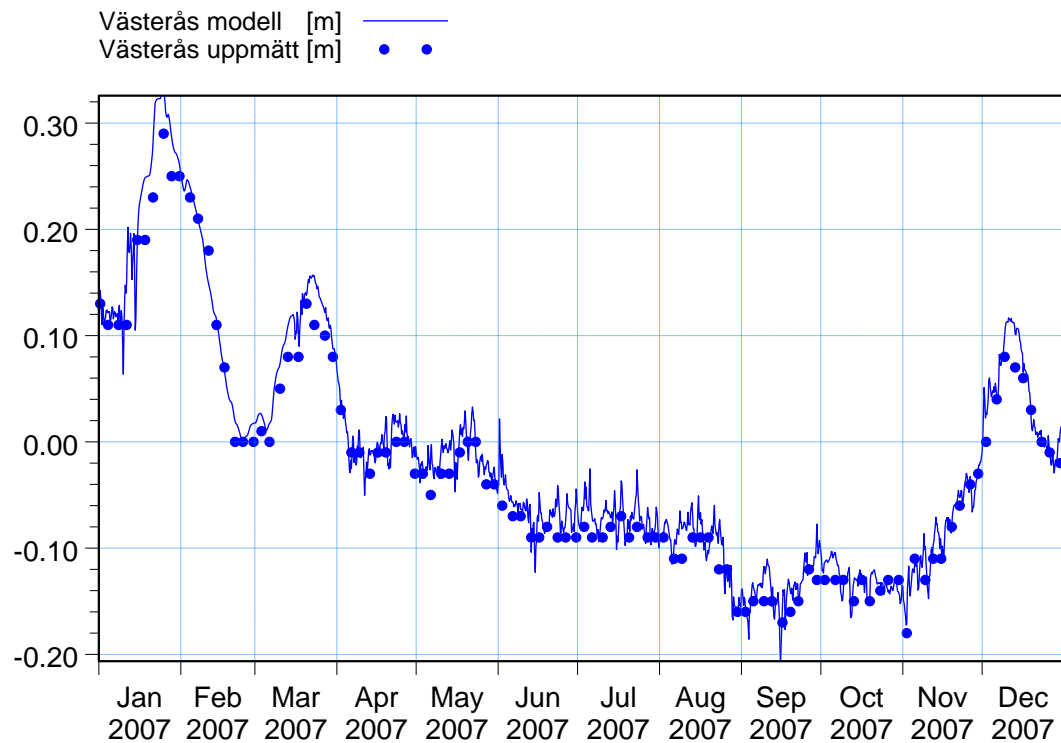
Figur 4-11 Uppmätt (SMHI) och modellerat utflöde i Stockholm (samtliga utflöden via Stockholm). Observera att definitionen av positiv riktning skiljer sig åt.

4.1.3 Vattennivå

Slutligen har modellerad vattennivå jämförts med uppmätta vattennivåer i Södertälje (Linäsundet) och Västerås hamn (se Figur 4-12 och Figur 4-13). Modellerade nivåer stämmer väl överens med uppmätta nivåer.



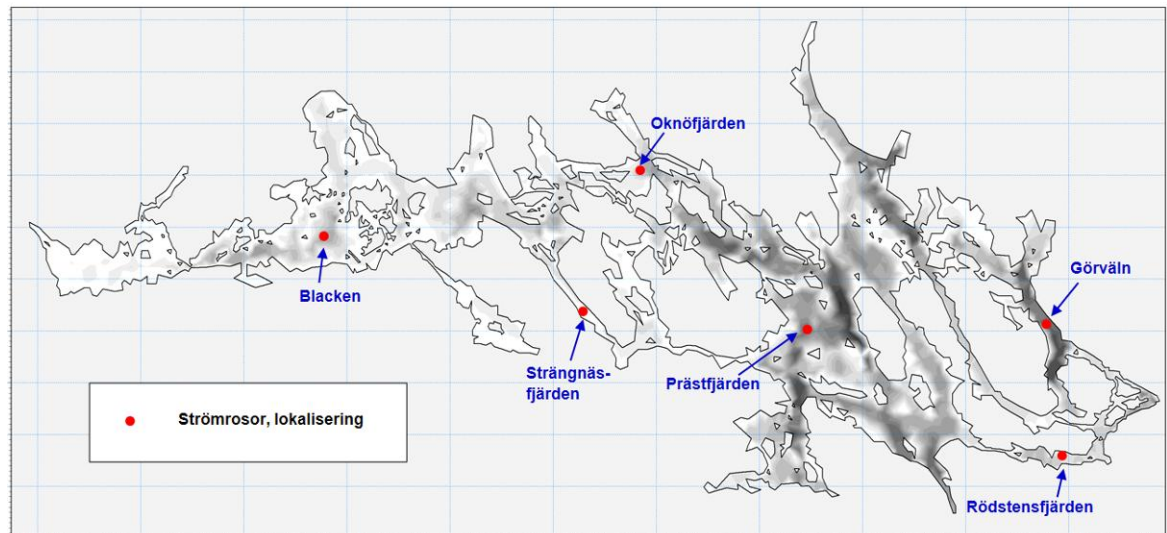
Figur 4-12 Uppmätt (SMHI) och modellerad vattennivå i Södertälje (Linäsundet).



Figur 4-13 Uppmätt (SMHI) och modellerad vattennivå i Västerås hamn.

4.2 Allmänt om cirkulationen i Mälaren

Resultaten från modellen när det gäller strömmarnas hastighet och riktning erhålls i tre tidsvarierande dimensioner. Att presentera detta omfattande material på ett begripligt vis är inte helt trivialt. Vi har här valt att presentera strömmönstret med hjälp av strömrosor på sex platser och två djup i Mälaren under två säsonger. Platserna har valts dels utifrån öst/västlig utbredning och dels för att representera djupa och grunda områden samt trånga sund och öppna fjärdar. Placeringen av strömrosorna visas i Figur 4-14. Strömmarnas variation i vertikalled representeras genom att en strömros tagits fram för ytströmmarna (på djupet 0,5 m) och en för bottenströmmarna (vilket innebär olika djup på de olika platserna, se Tabell 4-1).



Figur 4-14 Strömrosornas lokalisering.

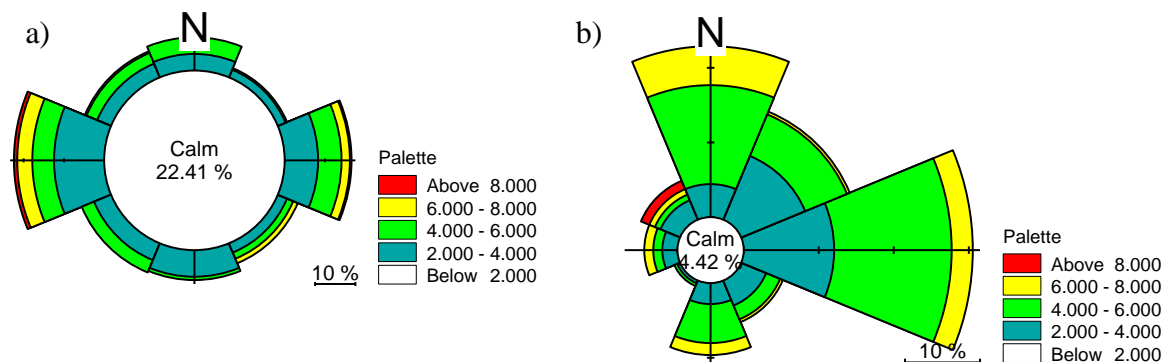
Tabell 4-1 Nivåer på vilka strömrosor tagits fram samt bottennivåer på samma platser.

Namn	Nivåer strömros	Bottennivå
Blacken	-0,5 och -18 m	-22,6 m
Strängnäsfjärden	-0,5 och -6 m	-7 m
Oknöfjärden	-0,5 och -17 m	-20,7 m
Prästfjärden	-0,5 och -30 m	-35,4 m
Görväln	-0,5 och -35 m	-43,7 m
Rödstensfjärden	-0,5 och -14 m	-15 m

Strömrosorna presenteras för två olika månader, dels för juni (låga vindhastigheter och låga flöden) och dels för december (höga vindhastigheter och höga flöden). Vindrosor för de två perioderna presenteras i Figur 4-15. Medelvindhastigheten var under juni 2,9 m/s och under december 3,9 m/s. Under juni var vindens riktning övervägande västlig och östlig, medan den i december var övervägande östlig och nordlig. Medelflödet i Eskilstunaån var under juni 3,4 m³/s och under december 21,9 m³/s.

Resultaten presenteras i Appendix 5, Figur A - 5 till Figur A - 8. Observera att vindrosor visar var vinden blåser *från*, medan strömrosor visar åt vilket håll det strömmar *åt*. Vid ytan i juni (Figur A - 5) är strömmarna fördelade relativt jämnt mellan alla riktningar i de öppna fjärdarna (Blacken, Oknöfjärden och Prästfjärden). I de trängre sunden (Strängnäsfjärden, Görväln och Rödstensfjärden) strömmar det som väntat i sundets riktning (relativt jämt fördelat i båda riktningar). Det bör påpekas att strömmarna i en viss punkt i en öppen fjärd inte kan förväntas återspegla den allmänna nettoströmriktningen, till skillnad från strömmen i ett smalt sund där vattnet inte har några alternativa vägar. Strömmarna i en öppen fjärd varierar både horisontellt och vertikalt, särskilt om topografien är komplicerad. Dessutom är nettoströmmen svag på sommaren då tillflöde-

na är små. De högsta strömhastigheterna i ytan återfinns i Görväln medan mycket låga strömhastigheter är mest ovanliga i Prästfjärden. Strängnäs-fjärden har de lägsta strömhastigheterna i ytan och även störst andel låga hastigheter.



Figur 4-15 Vindrosor under samma perioder som strömosorna: a) juni och b) december. Observera att procentskalorna skiljer sig åt.

För samma period men vid botten återfinns ett liknande mönster (Figur A - 6; observera att hastighetsskalan skiljer sig från den vid ytan). Strömhastigheterna är dock betydligt lägre på samtliga platser utom i Strängnäs-fjärden. Riktningarna i Strängnäs-fjärden är också något oväntade och beror antagligen på att modellen har svårt att beskriva hydrodynamiken korrekt med en begränsad upplösning (endast en beräkningscell tvärs sundet vid botten). Den låga upplösningen här leder även till att botten-topografin är svår att återge korrekt. Relativt höga strömmar återfinns också på 14 m djup i Rödstensfjärden och på 35 m djup i Görväln. Detta beror troligtvis på topografin samt de högre hastigheterna i ytan.

I ytan i december (Figur A - 7) skiljer sig strömmarnas fördelning över olika riktningar mot samma punkter i juni genom att man kan se en större andel strömmar i riktningen mot Mälarens utlopp p.g.a. de höga inflödena till sjön under denna period. Detta trots att det är ganska vanligt med ostliga vindar under denna period. Även under december återfinns de starkaste strömmarna i Görväln och de svagaste i Strängnäs-fjärden.

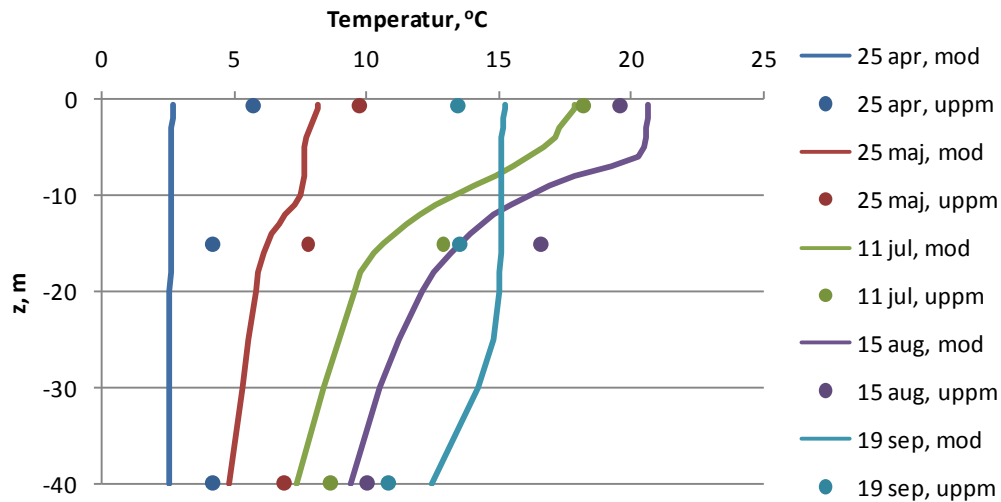
I Figur A - 8 visas strömosorna för bottenvattnet i december. Anmärkningsvärt är att bottenvattnet i Görväln nästan till hundra procent är riktat mot Mälarens utlopp i Stockholm och tämligen höga för att vara så djupt ner vilket visar på hur de stora mängderna vatten som kommer via inflödena trängs ihop mot utloppet. Återigen är strömmarna vid botten i Strängnäs-fjärden höga och uppenbarligen oralistiskt riktade. Lägst hastigheter återfinns i de öppna fjärdarna.

4.3 Temperatur

Ytterligare ett sätt att få en bild av vertikalomblandningen i Mälaren är att analysera temperaturprofiler. Temperaturen nivå beror av värmeutbytet med atmosfären men fördelning över djupet styrs framför allt av den vinddrivna vertikalomblandningen.

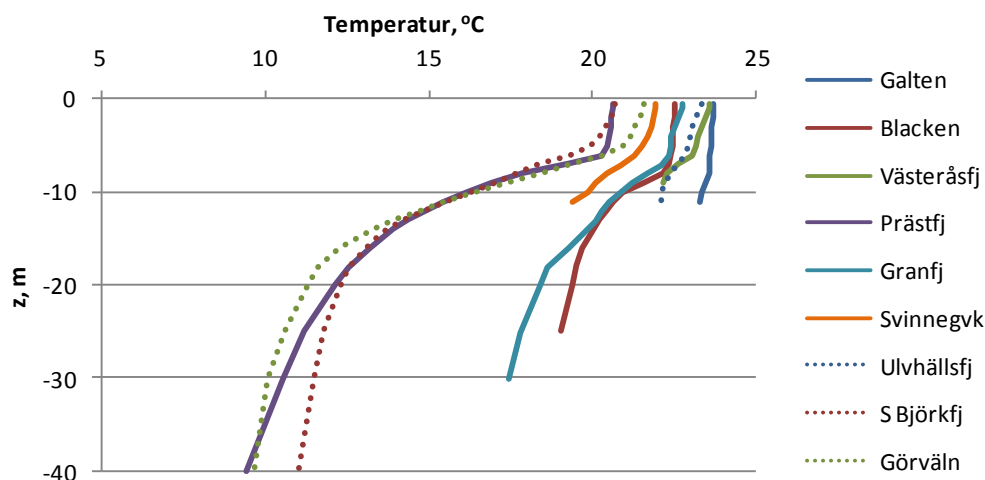
I Figur 4-16 visas den modellerade temperaturens fördelning över djupet i mätpunkten i Prästfjärden tillsammans med mätdata från samma tillfällen. Modellen visar att fjärden är omblandad i april, att ett språngskikt har börjat utvecklas i maj och är som tydligast i juli-augusti för att sedan börja brytas ner i september. Språngskiktet är lokaliserat till runt 10 m djup. Jämfört med uppmätta temperaturer ger modellen något för låga värden

över hela djupet i april och maj. I juli och augusti stämmer modellen bättre men det verkar som att det verkliga språngskiktet ligger något djupare och att skillnaden mellan yta och botten är något mindre. I september är de beräknade temperaturerna något högre över hela djupet jämfört med de uppmätta. Tyvärr är observationerna för få och har för låg vertikal upplösning för att några mer detaljerade slutsatser ska kunna dras.



Figur 4-16 Temperaturprofiler från mätpunkten i Prästfjärden vid alla mättillfällena under 2007. Heldragna linjer är modellresultat och prickar är uppmätta värden.

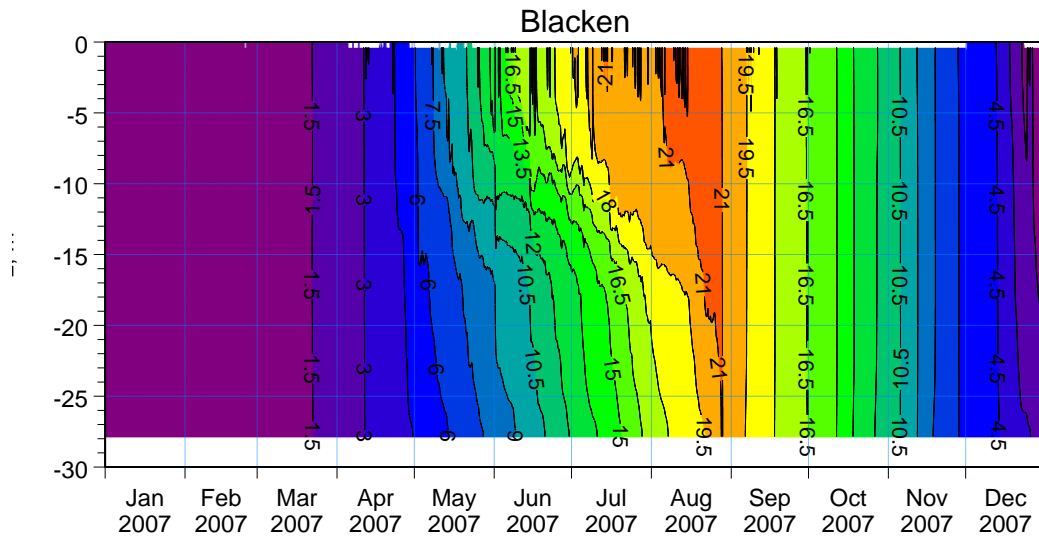
De modellerade temperaturprofilerna för samtliga mätstationer vid ett och samma tillfälle visas i Figur 4-17. De djupaste stationerna (Blacken, Prästfjärden och Södra Björkfjärden) har de kraftigaste temperaturgradienterna och ett medeldjup för språngskiktet på ca 10 m. De mätstationer som ligger i fjärdar med stora inflöden (Galten och Västeråsfjärden) är varmare över hela djupet än stationer i fjärdar utan större inflöden (Svinnegarnsviken och Granfjärden).



Figur 4-17 Modellerade temperaturprofiler 15 augusti 2007 för samtliga mätstationer.

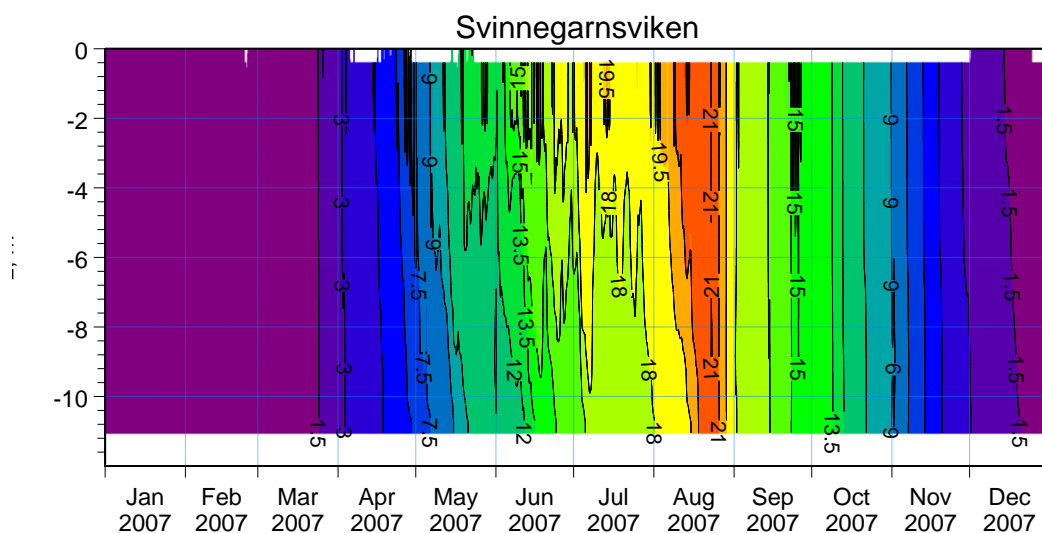
I Figur 4-18 till Figur 4-20 visas s.k. isopletdiagram för den modellerade temperaturen på tre stationer (Blacken, Svinnegarnsviken och Södra Björkfjärden) för hela året.

Blacken (Figur 4-18) är en tämligen djup mätstation i en större öppen fjärd med närhet till flera stora inflöden. Diagrammet visar att vattnet börjar värmas upp över hela djupet i mars och en temperaturskiktning börjar utvecklas i slutet av april. Temperaturgradienten är som kraftigast under juni-juli och skiktningen bryts sedan ner helt i slutet av augusti då hela vattenkolumnen är ca 20°C varm.



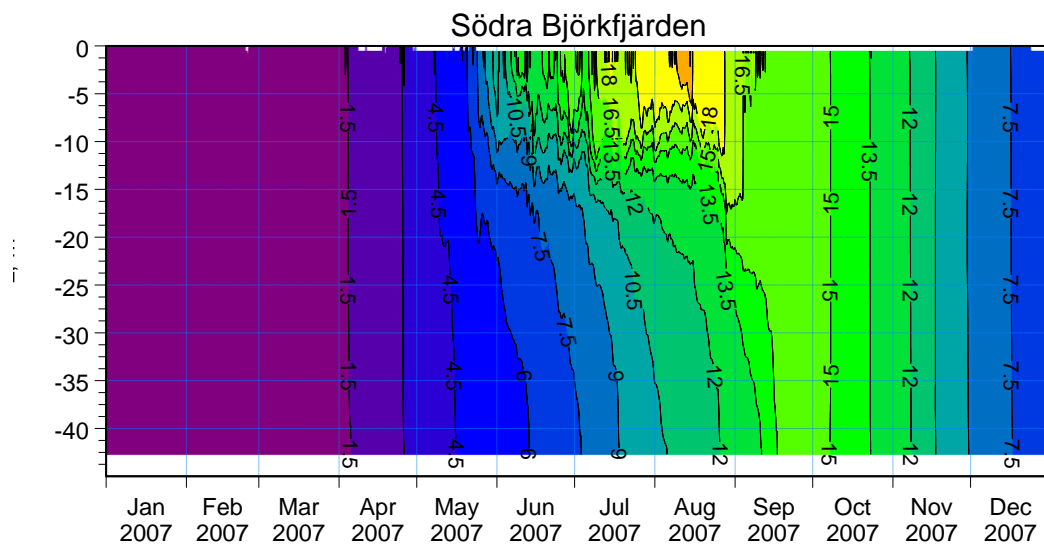
Figur 4-18 Den modellerade temperaturprofilens variation över året i Blacken .

En betydligt grundare och inte lika stor fjärd är Svinnegarnsviken vars temperaturisopletdiagram visas i Figur 4-19. Svinnegarnsviken värms upp snabbare på våren än den djupare Blacken och vertikalomblandningen når nästan ner till botten vid flera tillfällen under juni och juli. Även här homogeniseras vattenmassan över hela djupet i augusti.



Figur 4-19 Den modellerade temperaturprofilens variation över året i Svinnegarnsviken.

Södra Björkfjärden representerar en stor öppen fjärd utan direkt påverkan från stora inflöden (Figur 4-20). Här värms vattenvolymen upp långsammare än vid de två ovanstående platserna och en kraftig temperaturgradient etableras runt 10 m under juli och augusti. Inte förrän i slutet av september vertikalomblandas hela vattenkolumnen och då är temperaturen ca 15°C.



Figur 4-20 Den modellerade temperaturprofilens variation över året i Södra Björkfjärden.

4.4 Vattenutbytet mellan vattenförekomsterna

Ett av de viktigaste resultaten från den hydrodynamiska studien är utbytet mellan de olika vattenförekomsterna. Vattenförekomsterna samt gränserna däremellan och definitionen av positivt flöde över dessa visas i Appendix 4, Figur A - 4. Utbyte är dock tämligen svårt att kvantifiera. Vi har valt att beräkna utbytet på två olika sätt enligt nedan.

Det mest exakta värdet för nettoflödet fås som ett resultat direkt ur MIKE 3 FM där man definierar ett tvärsnitt (gränsen mellan två vattenförekomster) över vilken programmet beräknar nettoflödet under själva beräkningen. Med den här metoden kan man dock enbart få ett medelvärde över hela tvärsnittet och inte bruttoflödena, d.v.s. huruvida det flödar åt ena hållet på ett djup och åt andra hållet på ett annat djup. Detta kan innebära ett stort utbyte över gränsen även om nettoflöde är litet.

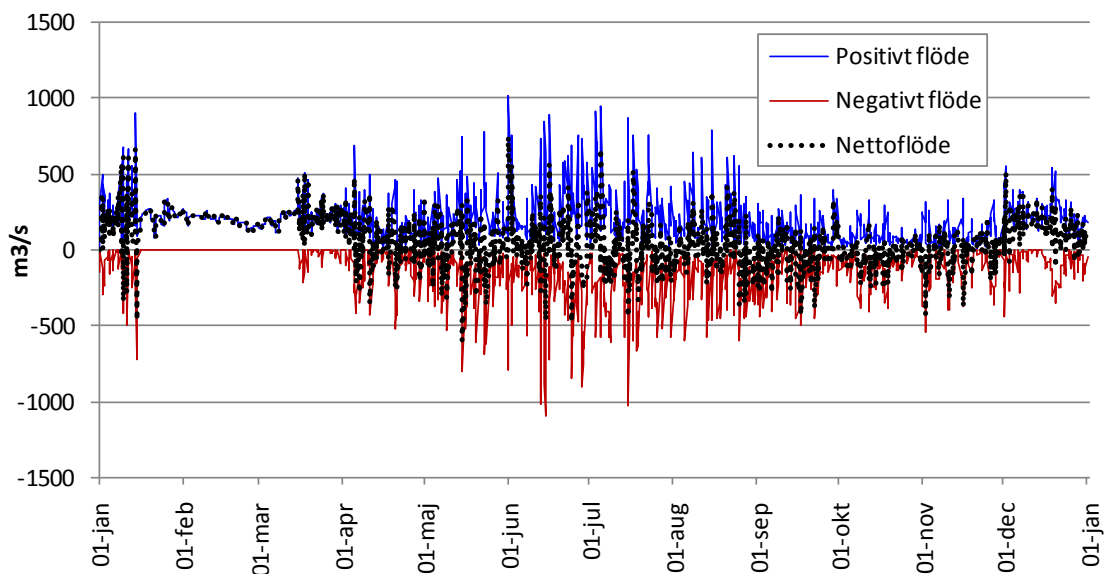
För att beräkna både positivt och negativt flöde över gränsen krävs efterberäkningar utifrån modellens resultat. Tvärsnittet delas då först upp i ett antal små fyrkantiga celler och flödena i u- och v-led i det ostrukturerade beräkningsnätet interpoleras till mitten av dessa celler. Sedan summeras för varje tidssteg flödet i alla celler med positiv riktning och flödet i alla celler med negativ riktning. Slutligen summeras alla positiva flöden och alla negativa flöden och skillnaden mellan dessa anger nettoflödet över gränsen. Slutresultatet påverkas i viss mån av antalet celler som tvärsnittet delats in i, tidssteget samt den exakta lokaliseringen av tvärsnittet. Interpoleringen till mitten av cellerna medför också vissa osäkerheter.

Resultatet från båda metoderna presenteras i Tabell 4-2. Nettoflödet är summan av det positiva och det negativa flödet som beräknats med efterbearbetning, vilket kan jämföras med värdet inom parentes som är det mer exakta nettoflödet beräknat inne i MIKE 3 FM. Tolkningen av siffrorna är alltså att 2617 Mm³ vatten per år transporteras från Gal-

ten till Blacken medan ca 233 Mm³ per år transporteras i motsatt riktning. Nettoflödet är således 2393 Mm³ vatten från Galten till Blacken per år eller 2228 Mm³ vatten beräknat med den exaktare metoden i MIKE 3 FM. Sammantaget gäller att värdena inom parentes ger nettoflödena genom varje tvärsnitt, medan de positiva och negativa flödena ger en uppskattning av bruttoutbytet. Skillnaden mellan nettoflödet beräknat som summan av bruttouflödena och nettoflödet inom parentes ger en uppfattning om noggrannheten.

I de fall där gränsen mellan två vattenförekomster är belägen i ett trångt sund med en tydlig flödesriktning (t.ex. Galten till Blacken) fås ett nettoflöde som är skillnaden mellan ett stort och ett litet flöde. Är gränsen istället belägen över en ganska öppen del av en fjärd (t.ex. Prästfjärden till Norra Björkfjärden) blir istället nettoflödet skillnaden mellan två mycket större flöden i vardera riktningen. Utbytet är alltså mycket större än nettoflödet. Att redovisa bruttouflöde och inte bara nettoflöde är därför av stor vikt för beräkningar av utbytet och transport av ämnen.

Eftersom modellen har en tidsupplösning på sex timmar kan man även analysera flödenas variation i tiden. En sådan analys ryms inte inom denna övergripande rapport men ett exempel på säsongsvariationer i utbytet visas i Figur 4-21. Figuren visar flödet från Granfjärden till Gisselfjärden (positivt) och från Gisselfjärden till Granfjärden (negativt). Den istäckta perioden 15 januari till 15 mars syns tydligt då endast det långsamma flödet från inloppen till Mälaren mot Stockholm ger ett relativt jämt positivt flöde över hela tvärsnittet. Motsatsen till detta sker mitt i sommaren, då temperaturskiktningen är stabil och vinden påverkar ytvattnets riktning. Sommarmånaderna kännetecknas därmed av ett väldigt varierat flöde med höga flödestoppar i både positiv och negativ riktning. Inflödestoppen i december ger också ett relativt stabilt positivt flöde.



Figur 4-21 Flödet över vattenförekomstgränsen mellan Granfjärden och Gisselfjärden över året. Positivt flöde definieras som flödet från Granfjärden till Gisselfjärden.

Tabell 4-2 Ackumulerade flöden mellan vattenförekomsterna för 2007. Nettoflöde i fetstil inom parentes är beräknat med en exaktare metod i MIKE 3 FM medan övriga siffror är beräknade i efterhand utifrån modellresultaten.

Från vattenförekomst	Till vattenförekomst	Nettoflöde Mm ³	Positivt flöde Mm ³	Negativt flöde Mm ³
Galten	Blacken	2393 (2228)	2617	-223
Blacken	Granfjärden	1341 (1446)	1927	-586
Västeråsfjärden	Blacken	-1216 (-1287)	1424	-2640
Västeråsfjärden	Granfjärden	1158 (1468)	3202	-2045
Sörfjärden	Granfjärden	81 (50)	126	-45
Granfjärden	Gisselfjärden	2571 (2919)	6838	-4267
Granfjärden	Oxfjärden	75 (70)	96	-21
Gisselfjärden	Oxfjärden	2366 (2588)	3992	-1625
Oxfjärden	Arnöfjärden	2815 (2834)	3962	-1147
Gisselfjärden	Tynnelsöfjärden	230 (349)	399	-169
Tynnelsöfjärden	Arnöfjärden	146 (360)	1063	-917
Tynnelsöfjärden	Prästfjärden	0,4 (24)	59	-59
Arnöfjärden	Prästfjärden	2546 (3281)	8926	-6380
Prästfjärden	N Björkfjärden	1662 (2266)	12798	-11135
Gripsholmsviken	Prästfjärden	33 (101)	4798	-4765
Prästfjärden söder om Ridön	S Björkfjärden	-472 (-408)	2799	-3271
Prästfjärden norr om Ridön	S Björkfjärden	1024 (1569)	5342	-4317
N Björkfjärden	S Björkfjärden	-301 (-272)	2330	-2531
N Björkfjärden	Långtarmen	133 (222)	557	-424
N Björkfjärden	Görväln	2555 (2397)	3620	-1064
Görväln	Fiskarefjärden	3465 (3272)	4380	-915
Långtarmen	Görväln	-4 (38)	394	-398
Långtarmen	Fiskarefjärden	127 (198)	158	-32
S Björkfjärden	Fiskarefjärden	739 (843)	1640	-901

4.5 Vattnets omsättningstid

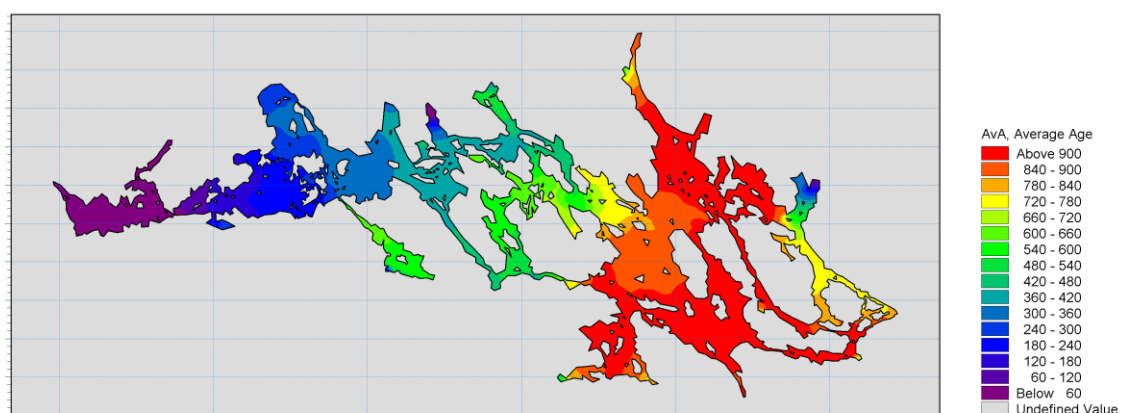
Ett användbart mått för att förstå cirkulationen i ett vattenområde är vattnets ”ålder”, d.v.s. hur länge ett viss vattenpaket befinner sig i ett område. Detta kan beräknas på ett enkelt sätt med hjälp av en extra modul i MIKE 3 kallad ECO Lab och formuleras av en enda ekvation:

$$\frac{dA}{dt} = 1$$

A är ett tänkt spårämne vars koncentration i en punkt ökar för varje tidssteg med samma belopp som längden på tidssteget. Till exempel, om $A = 10$ vid en tidpunkt och tidssteget är 2 så blir A vid nästa tidssteg 12. Därmed representerar halten av A åldern på vattnet. Detta spårämne transporteras och blandas även med omgivande vatten. Om halten av A sätts till noll i allt vatten som kommer in i Mälaren utifrån så representerar A vattnets ålder relativt vatten utanför Mälaren d.v.s. hur lång tid som varje vattenpaket har varit i Mälaren.

För att få ett mått på omsättningstiden simulerar man sedan åldern under en längre tid. Värdet på A kommer att variera men bör så småningom hålla sig runt ett medelvärde då åldrandet och utbytet med omgivningen balanserar varandra. Detta medelvärde, integrerat över en given volym, ger medelåldern (”Average Age” eller AvA på engelska) för den aktuella volymen, vilket är ett mått på omsättningstiden.

Den enkla ECO Lab-modellen kopplades till den hydrodynamiska modellen med A satt till noll i alla tillflöden samt på alla öppna ränder. När simuleringen startar bör vattnets ålder inte vara noll, eftersom vattnet redan befunnit sig i Mälaren. I stället kördes modellen om i tre omgångar (tre år), där varje simulering startades utifrån slutresultatet av den tidigare. I Figur 4-22 visas den slutliga åldern på Mälarens ytvatten. Åldern på andra djup skiljer sig inte nämnvärt. I Galten har vattnet varit i Mälaren i mindre än 60 dagar medan i Södra Björkfjärden, Långtarmen och Norra Björkfjärden har vattnet varit i Mälaren mer än 900 dagar. Det äldsta vattnet är sannolikt ännu äldre än vad figuren visar och det hade behövts ännu fler års simulering för att uppnå stabil ålder. Vatten som är yngre än 500 dagar har däremot uppnått stabil ålder. Observera att vattnet som kommer in i modellen via Stäket räknas som ”nytt” vatten (ålder noll) även om det befunnit sig en tid i Mälaren norr om Stäket.



Figur 4-22 Ytvattnets beräknade ålder (dagar) efter tre års simulering.

5 Diskussion

Resultaten från den hydrodynamiska modellen visar på en komplexitet i cirkulationen och skiktningen. Strömmönstret varierar framför allt med variationerna i vindens drivning och i tillflödena. MIKE 3 FM-modellen bör ge en i huvudsak realistisk bild av hydrodynamikens komplexitet och strömmarnas variation på olika platser, djup och under olika säsonger. Kvantifieringen av utbytet mellan vattenförekomsterna ger en bild av den generella transporten i sjön.

Ungefär mitt i Mälaren i öst-västlig led tvingas nettoflödet dela sig mellan två alternativa vägar, en nordlig under Hjulstabron och en sydlig genom Strängnäs-fjärden. Modellen visar att större delen av flödet ($2834 \text{ Mm}^3/\text{år}$ eller $90 \text{ m}^3/\text{s}$) går den norra vägen medan en mindre del ($349 \text{ Mm}^3/\text{år}$ eller $11 \text{ m}^3/\text{s}$) går den södra vägen. Detta kan förklaras med att minsta tvärsnittsarean den södra vägen är knappt 2000 m^2 , vilket är mindre än minsta tvärsnittsarean den norra vägen som är uppskattningsvis 3000 m^2 . Dessutom ger Strängnäs-fjärden mer motstånd för flödet i form av friktion då fjärden är lång och smal jämfört med den norra vägen där det endast är avsmalnat kortare sträckor. Efter Strängnäs-fjärden kan vattenflödet återigen dela sig, så att det antingen kan gå norrut via Tynnelsö-fjärden till Arnö-fjärden eller fortsätta österut genom den mycket smala Stallarholms-fjärden. Kolsundet i Stallarholms-fjärden är grunt med ett tvärsnitt på endast ca 500 m^2 . I modellen går därför mer än 90 % av flödet via Strängnäs-fjärden norrut genom Tynnelsö-fjärden. Sammantaget blir därmed nettoflödet som når Prästfjärden via den norra vägen ca $3281 \text{ Mm}^3/\text{år}$ eller $104 \text{ m}^3/\text{s}$ medan det via den södra vägen kommer ca $24 \text{ Mm}^3/\text{år}$ (ca $0,8 \text{ m}^3/\text{s}$).

Dessa resultat kan jämföras med SMHI:s kustzonsmodell för Mälaren där medelvärdet för perioden 1990-2008 av flödena mellan ett antal fördefinierade bassänger redovisas. Medelflödet genom Strängnäs-fjärden respektive Oknö-fjärden (efter Hjulstabron) är ungefär lika stora ($61,4 \text{ m}^3/\text{s}$ respektive $66,7 \text{ m}^3/\text{s}$). Till Prästfjärden kommer $112 \text{ m}^3/\text{s}$ den norra vägen och $18,7 \text{ m}^3/\text{s}$ den södra vägen via Stallarholms-fjärden. Sammantaget visar alltså kustzonsmodellen på ett större flöde den södra vägen än den tredimensionella modell som använts här, men i båda modellerna går huvuddelen av nettoflödet den norra vägen.

Det bör påpekas att Kustzonsmodellen skiljer sig avsevärt från den modell som använts här, i att den tidigare är en s.k. boxmodell. Det innebär att Mälaren beskrivs som ett antal vertikalt högupplösta men horisontellt homogena bassänger ("boxar") mellan vilka utbytet beräknas med hjälp av hydrauliska formler. I MIKE 3 beräknas utbytet mellan alla närliggande beräkningsceller utifrån de grundläggande strömningsekvationerna, inklusive flödena i sunden. I gengäld beror beräkningarnas noggrannhet på hur väl modellen löser upp sundens topografi. Man bör därför inte förvänta sig att de två modellerna ger exakt samma resultat, även om indata skulle vara identiska.

Den tredimensionella modell som satts upp för Mälaren visar på en relativt god överensstämmelse med tillgängliga observationer. Resultaten är dock förknippade med vissa osäkerheter som bör beaktas vid tolkningen:

- För flera av **tillflödena** saknas mätdata och eftersom dessa är viktiga för den övergripande nettotransporten från väst till öst medför det osäkerheter i modellen. Däremot är påverkan på bruttoflödena och därmed utbytet väsentligt mindre.
- Eftersom **vinddata** kommer från östra Mälaren (Adelsö) och sjön har en stor utsträckning i både öst-västlig och nord-sydlig riktning är vinddrivningen osäker i

delarna som är långt bort från mätstationen. Vinden är på många ställen den viktigaste faktorn för strömningen och vertikalomblandningen vilket leder till vissa osäkerheter i resultaten.

- Tillgången på **djupdata** är för stora delar av Mälaren (förutom i farlederna där Sjöfartsverket har högupplösta data) ganska gles, vilket gör att djupen i modellen är något osäkra. Dessutom är djupen mätta främst med avseende på sjöfart och då är grunda områden bättre uppmätta än djupa, vilket kan ge ett något underskattat djup i medel. Djupen påverkar framför allt den totala utbytestiden men även vattenmassans temperatur.
- **Lufttemperaturen** är representativ för de östra delarna av Mälaren och liksom för vinden ökar osäkerheten med avståndet från mätstationen på Adelsö. Temperaturen påverkar värmeutbytet och således också temperaturprofilen. I jämförelse med mätdata märks det att de modellerade temperaturprofilerna stämmer bäst överens med uppmätta temperaturer i de östra delarna av Mälaren.
- Detsamma gäller **nederbörden** på ytan av sjön, då denna också uppmätts på Adelsö. Dock spelar regnet på ytan en väldigt liten roll i Mälarens massbalans vilket visade sig uppenbart då modellen testkördes helt utan regn på ytan. Skillnaderna i resultat var knappt synbara.
- Tillgången på **hydrografisk mätdata** är låg och framför allt saknas helt strömmätningar att jämföra med. I stort sett finns endast temperaturprofilerna att jämföra modellen med men även där är tillgången på mätdata ganska dålig, både vad gäller antalet mätdjup och mätfrekvensen. MIKE 3 FM innehåller en hel del parametrar som är tänkta att kalibreras för olika typer av vattenområden. Till exempel beter sig olika stora sjöar på olika sätt, och sjöar skiljer sig från havet på andra sätt. För att kunna anpassa en modell optimalt för ett visst vattenområde behöver dessa parametrar ställas in genom att jämföra modellresultat med mätningar. Dock är det oftast ganska små anpassningar som krävs och resultaten är pålitliga även utan dessa, men felmarginalen blir större utan anpassning. MIKE 3 FM modellen har anpassats efter de temperaturdata som finns.
- **Modelleringsåret** 2007 innebar något lägre inflöden än ett normalår vilket påverkar modellresultatet på samma sätt som osäkerheten i tillflödena.
- På vissa ställen är modellens **rumsliga upplösning** uppenbarligen för grov för att korrekt kunna beskriva strömningen i detalj. Upplösningen på beräkningsnätet har hållits nere för att undvika allt för långa beräkningstider. Ett år tar idag ca 10 dagar att simulera på en dator med fyra snabba processorer. Ett exempel på hur upplösningen påverkar resultaten är strömmarna nära botten i Strängnäs-fjärden som uppenbarligen inte är helt korrekta (se avsnitt 4.2). Detta påverkar sannolikt även flödesberäkningarna.
- **Nettoflödet** mellan vattenförekomsterna har beräknats med två metoder som ger en viss skillnad i resultaten. Resultaten påverkas dessutom av var exakt man definierar vattenförekomsternas gränser samt upplösningen i tid och rum. Därför bör inte flödenas värden ses som exakta utan som goda uppskattningar. Till sammans med den relativa storleken på de positiva och negativa flödena över gränserna fås en övergripande bild av utbytet.

Ovanstående osäkerheter uppskattas i snitt ge upphov till en felmarginal i integrerade storheter såsom flöden på några tiotal procent. Däremot bör man naturligtvis inte för-

vänta sig denna noggrannhet i en enskild punkt vid ett specifikt tillfälle. De generella resultaten från modellen är däremot sannolikt tillräckligt goda för att ge en generell bild av Mälarens storskaliga hydrodynamik samt för att uppskatta utbytet mellan olika delar av Mälaren och därmed transporten av ämnen däremellan. Beroende på vad man önskar undersöka med modellen kan det däremot behövas vissa modifikationer. Framför allt vore en mätkampanj med högfrekventa observationer under en kortare tid vara till stor nytta för att kunna kalibrera modellen optimalt.

Som nämnts ovan är hydrodynamiken i Mälaren komplex. Den varierar både i tid och i rum. Det går inte att på ett enkelt sätt heltäckande beskriva strömmönstret och dess variationer i sjön. Strömrosorna, temperaturprofilerna, utbytena mellan vattenförekomsterna och vattnets ålder ger en god övergripande bild av modellresultaten men det finns otaliga fler möjligheter att analysera och presentera den information som modellen genererar.

Förutom att beskriva och kvantifiera cirkulationen i Mälaren har den nu uppsatta modellen en mängd framtida användningsområden. Här ges några exempel:

- **Fler resultat för specifika ändamål** kan extraheras. Det kan vara t.ex. flödesvariationerna över djupet i ett visst sund, strömrosor för fler platser och fler säsonger, eller flödesmönstret i en vattenförekomst på ett visst djup. Årstidsvariationerna i utbytet mellan vattenförekomsterna kan också vara intressanta att till exempel koppla till perioder av större/mindre tillförsel av föroreningar/näringsämnen till olika vattenförekomster.
- Om ett visst område är av specifikt intresse skulle denna del av modellen förfinas. Alternativt så sätts en ny modell upp för detta område med en betydligt **högre upplösning** där resultaten från aktuell modell används som randvärden.
- Med hjälp av tilläggsmodulen ECO Lab som här använts för att beräkna vattnets ålder kan en mängd simuleringar göras med hydrodynamiken från aktuell modell som bas. Till exempel kan man simulera **utsläpp** av olika typer, både transport och nedbrytning, **näringscykeln** i sjön, och **badvattenkvalitetsprognoser** som kan publiceras on-line på internet.
- En avrinningsmodell kan kopplas till den hydrodynamiska modellen så att möjliga **åtgärder i avrinningsområdet**, t.ex. när det gäller utsläpp av näringsämnen, kan simuleras och optimeras.
- **Klimatförändringar** i form av ändrade temperaturer och vindmönster kan simuleras i den hydrodynamiska modellen, alternativt i form av ändrad nederbörd och ändrade växtförhållanden i en eventuell avrinningsmodell som kopplas till modellen.

6 Slutsatser

DHI har simulerat hydrodynamiken i Mälaren med MIKE 3 FM under ett år. Resultaten ger en bild av den övergripande cirkulationen i sjön samt temperaturskiktningen. Modellen kan i framtiden användas för en mängd olika studier och applikationer.

Det övergripande cirkulationsmönstret i Mälaren är att ytvattnet till stor del följer vindarnas riktning och styrka, särskilt under sommarperioden då vattnet är skiktat och tillförseln från vattendrag liten. I smala passager följer yt- och bottenströmmarna sundet i längsgående riktning. Under vintern (då sjön inte är täckt av is) påverkas strömmarna också tydligt av de stora tillflödena som transporterar vatten mot Stockholm och Södertälje. Tillflödena dominerar helt strömbilden då sjön är istäckt.

Temperaturens fördelning över tid och djup beror av platsens djup, vindexponering samt närhet till större tillflöden. Sommarsprångskiktet återfinns på 10-15 m djup under juli till augusti och även in i september i de stora och djupa bassängerna.

Utbytet per år mellan vattenförekomsterna ger en bild av den övergripande transporten i Mälaren. Utbytet varierar inte bara i kvantitet mellan de olika gränserna utan även i karaktären såtillvida att det vid vissa gränser i huvudsak flödar i ena riktningen medan vid andra sker stora flöden i båda riktningar som summeras till ett relativt litet nettoflöde.

Modellresultaten tyder på att huvuddelen av nettoflödet genom centrala Mälaren går en nordlig väg, men hur dominerande den nordliga transportvägen är kräver sannolikt ytterligare utredning.

Vattnets ålder (uppehållstid) i Mälaren varierar med vatten yngre än 60 dagar i Galten till det äldsta vattnet som återfinns i Södra och Norra Björkfjärdarna samt Långtarmen. Där återfinns vatten som befunnit sig i Mälaren i över 3 år. Vattnet som flödar in via Stäket räknas som nytt vatten och därför är utgående vatten via Stockholm i medel något yngre än det äldsta vattnet som återfinns i sjön.

Referenser

Liungman, Olof, Borell Lövstedt, Charlotta, Karlsson, Dick, & Karlsson, Anna (2009). *En strömningsmodell för Mälaren – förstudie*. DHI, Rapport till Mälarens Vattenvårdsförbund, s. 21.

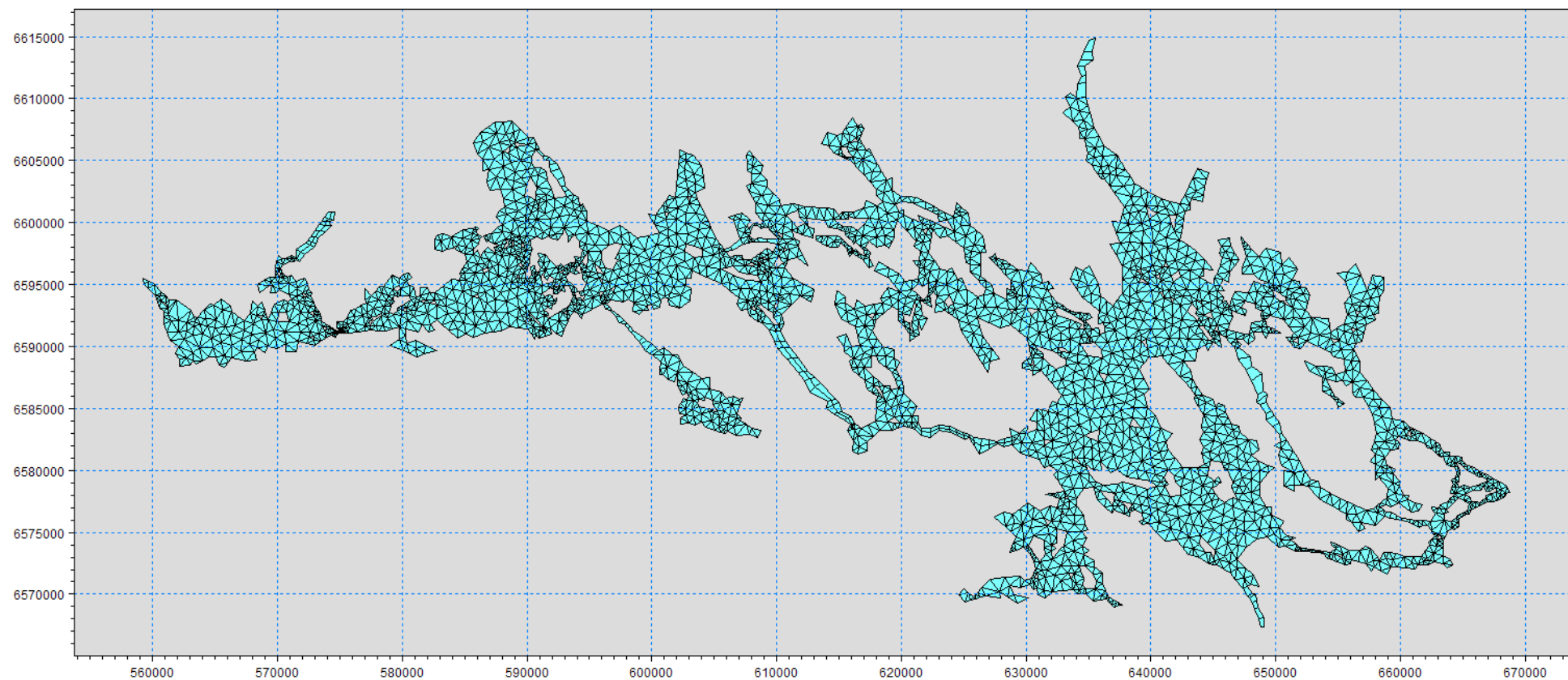
DHI (2009). *MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM Hydrodynamic and Transport Module Scientific Documentation*. DHI Software, s. 50.

DHI (2009). *MIKE 3 Flow Model FM Hydrodynamic Module User Guide*. DHI Software, s. 116.

Sahlberg, Jörgen och Gustafsson, Hanna (2010). *HOME Vatten i Mälaren*. Oceanografi Nr 103/2010, SMHI.

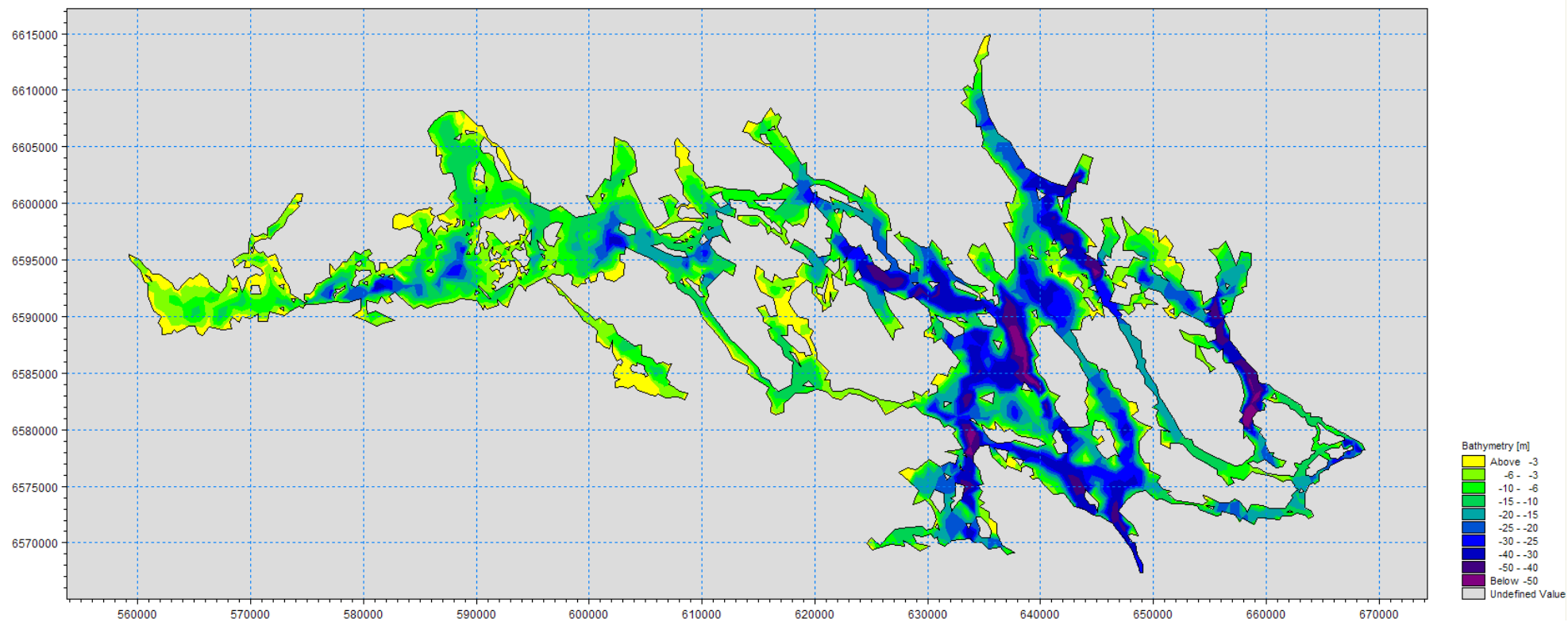
Wallin, Mats (red.) (2000). *Mälaren Miljö tillstånd och utveckling 1965-98*. Sveriges Lantbruksuniversitet, Institutionen för miljöanalys. Rapport till Mälarens Vattenvårdsförbund, s. 94.

Appendix 1. Beräkningsnätet.



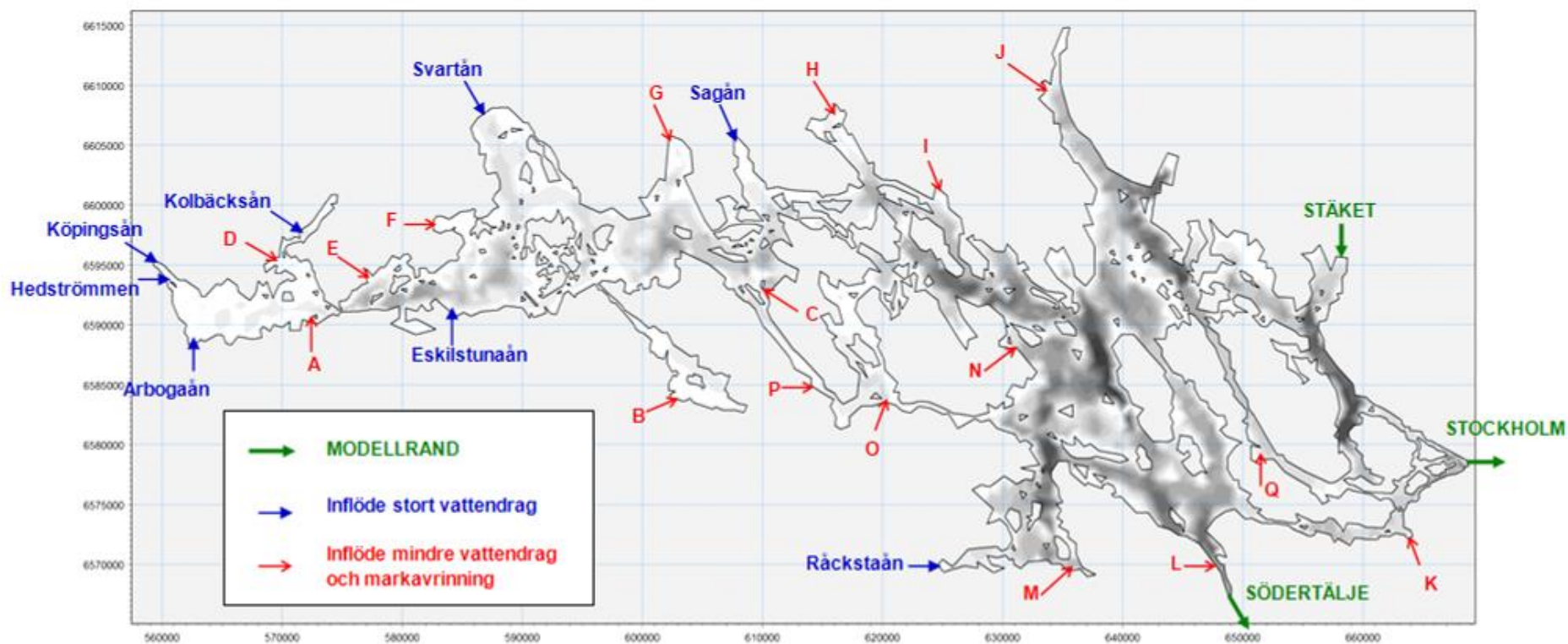
Figur A - 1 Beräkningsnätet i MIKE 3 FM-modellen.

Appendix 2. Batymetri



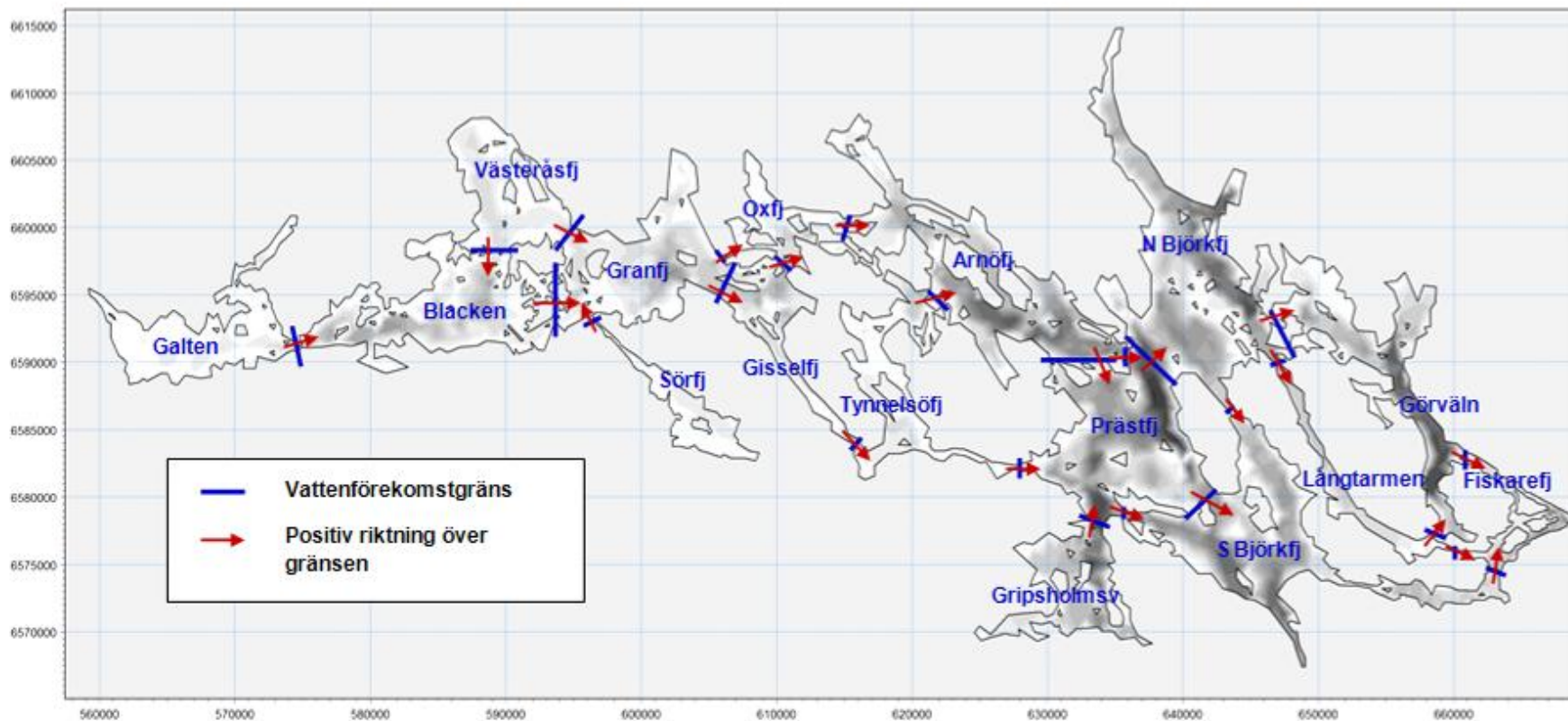
Figur A - 2 Batymetrin i MIKE 3 FM-modellen.

Appendix 3. Mälarens in- och utflöden.



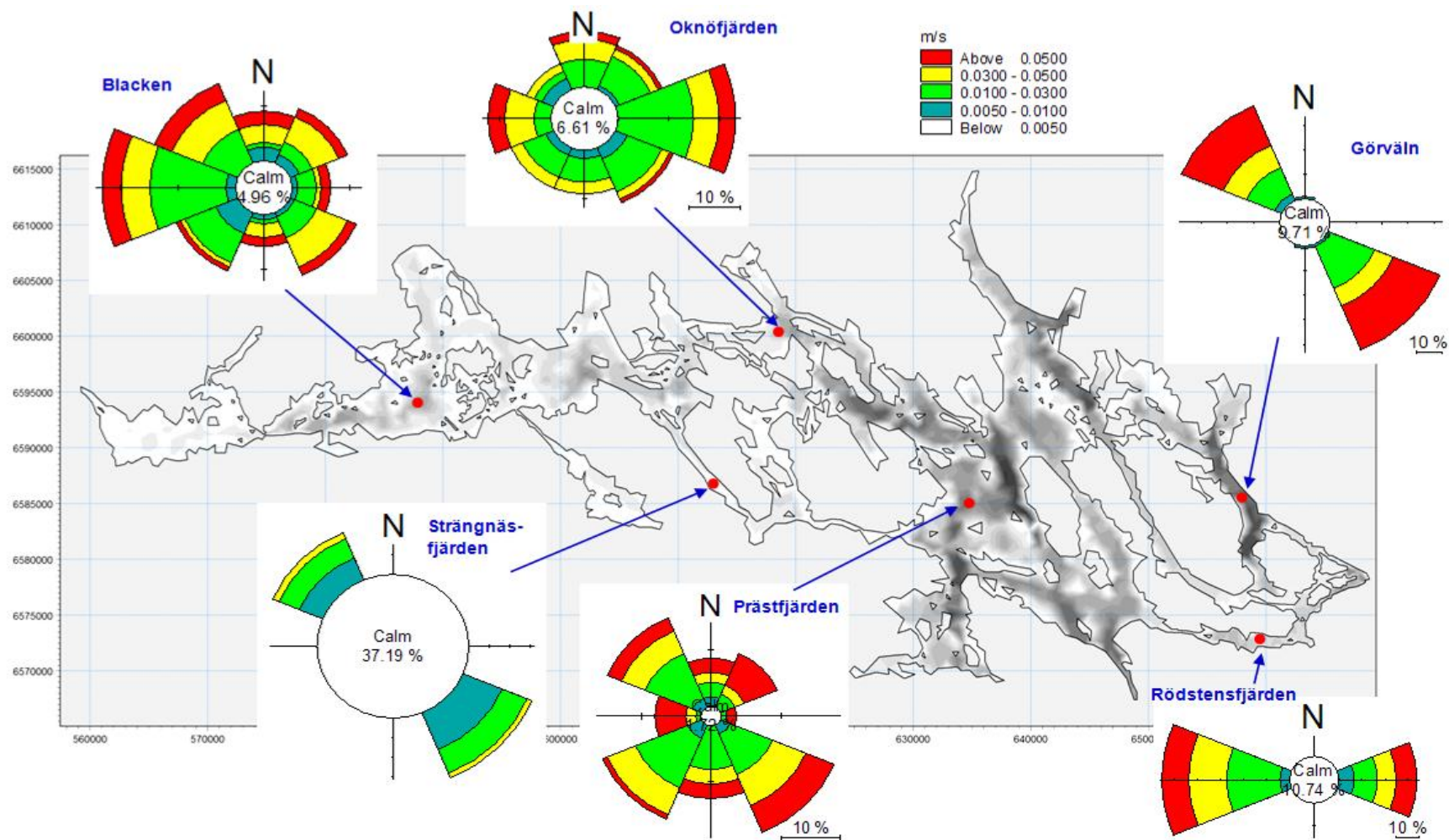
Figur A - 3 Mälarens in- och utflöden samt öppna ränder i MIKE 3 FM-modellen.

Appendix 4. Gränser mellan vattenförekomster.

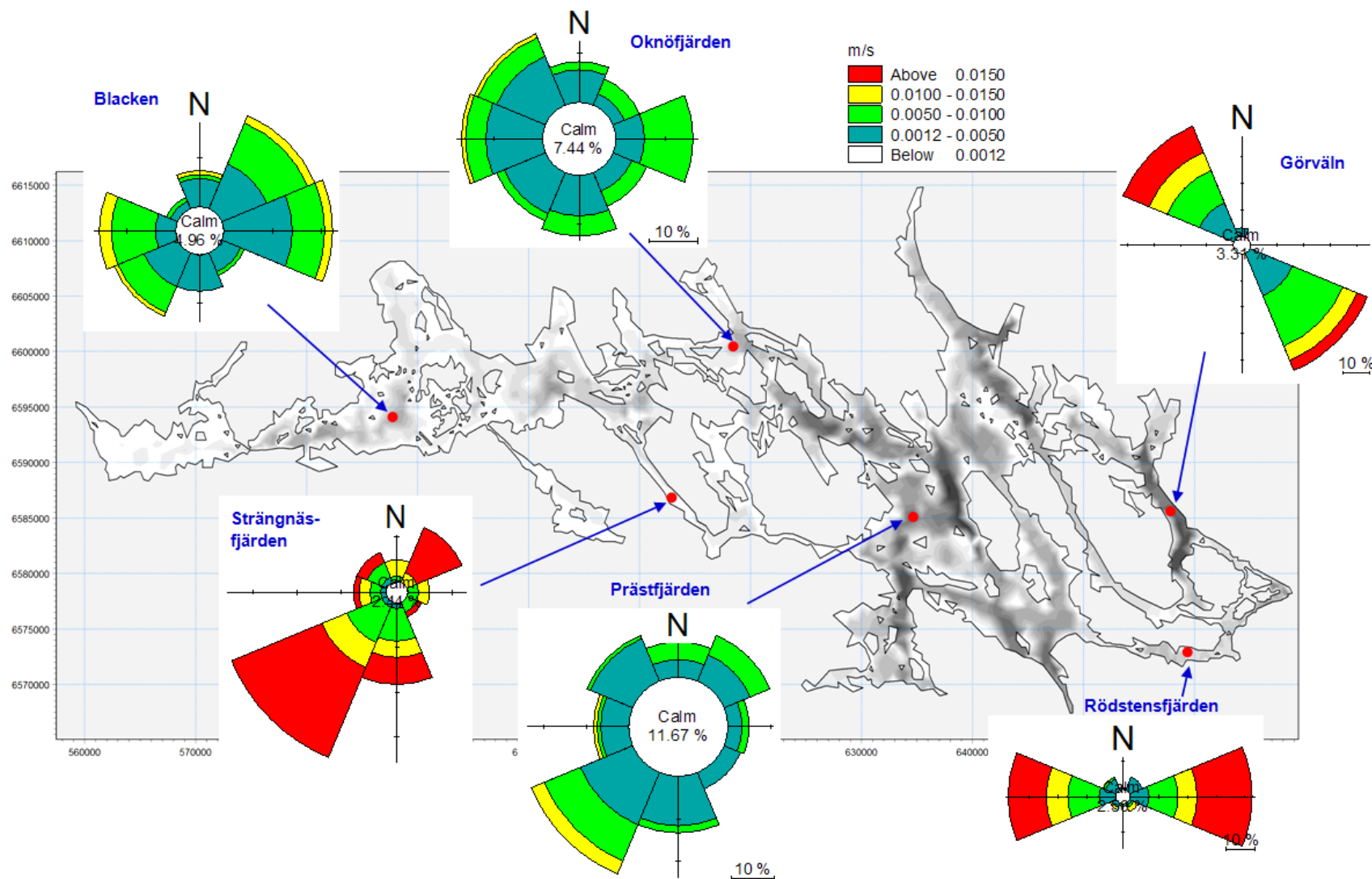


Figur A - 4 Indelning av de sammanslagna vattenförekomster i Mälaren som används i föreliggande studie samt definition av positiv flödesriktning.

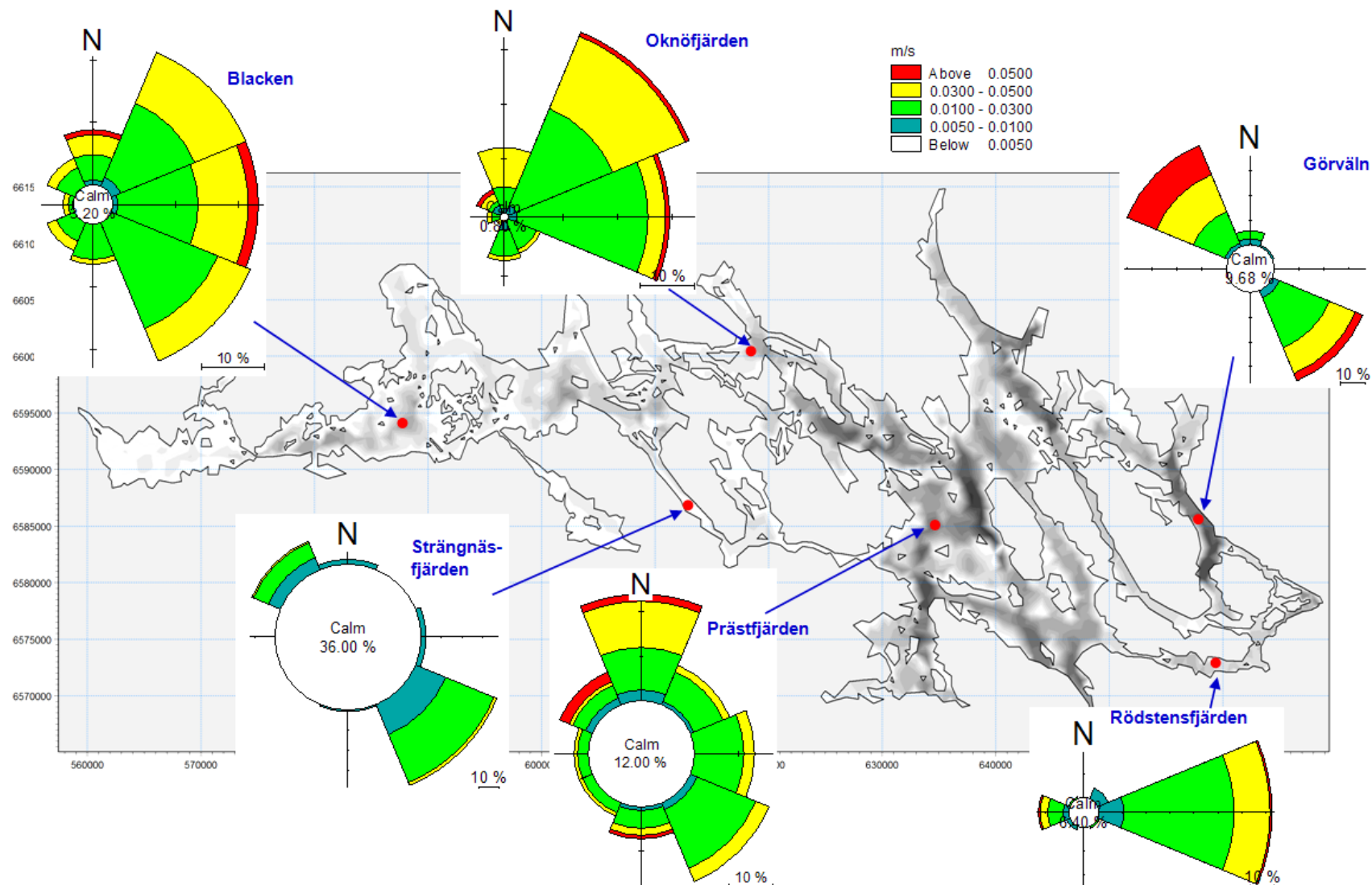
Appendix 5. Modellresultat - strömmrosor.



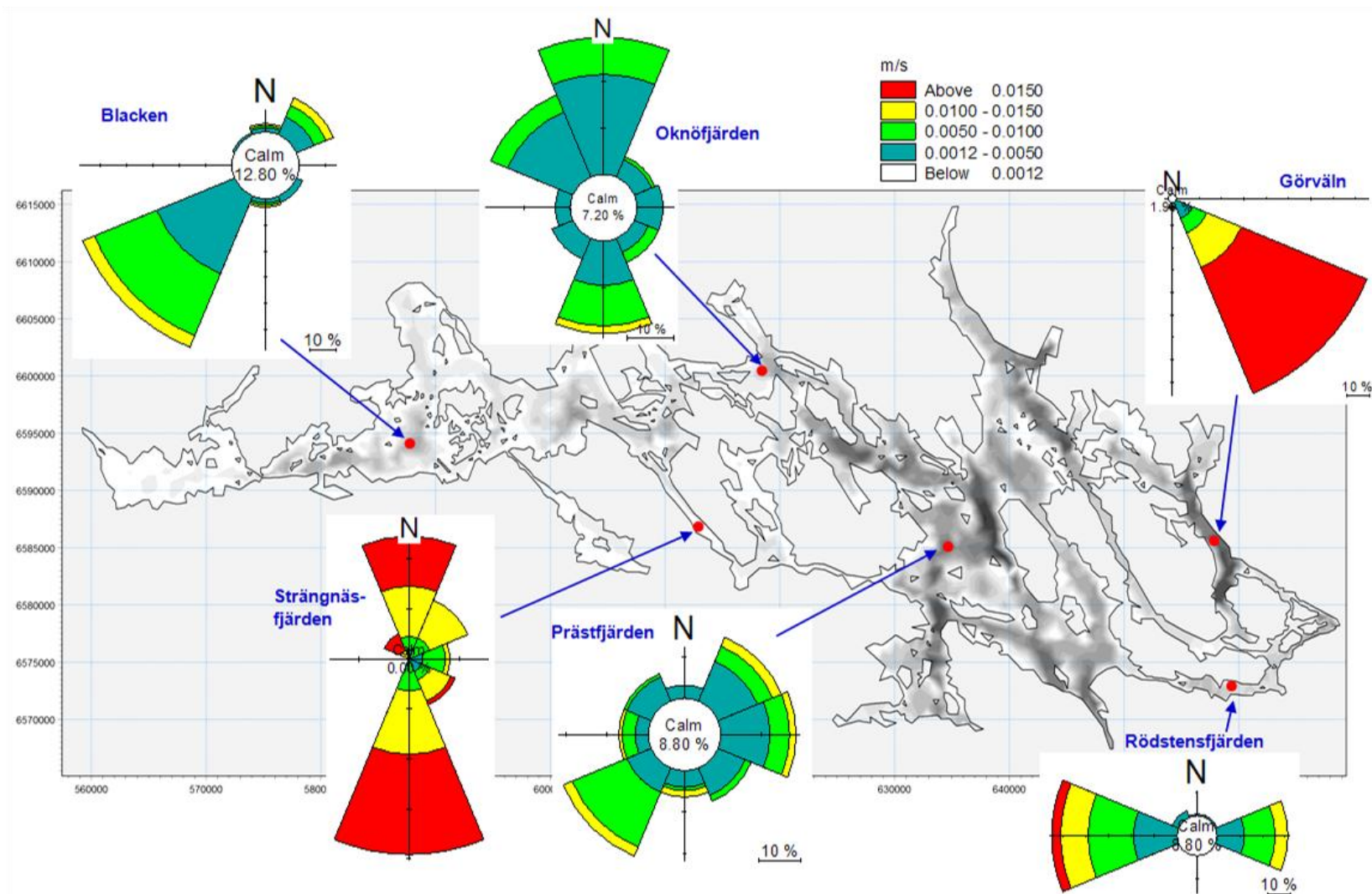
Figur A - 5 Strömmrosor i juni vid ytan (-0,5 m). Alla rosor har samma färgskala men olika procentskalor.



Figur A - 6 Strömrosor i juni vid botten (Blacken: -18 m; Strängnäs-fjärden: -6 m; Oknöfjärden: -17 m; Prästfjärden: -30 m; Görvåln: -35 m; Rödstensfjärden: -14 m). Alla rosor har samma färgskala men olika procentskalor.



Figur A - 7 Strömrosor i december vid ytan (-0,5 m). Alla rosor har samma färgskala men olika procentskalor.



Figur A - 8 Strömrosor i december vid botten (Blacken: -18 m; Strängnäsfjärden: -6 m; Oknöfjärden: -17 m; Prästfjärden: -30 m; Görvån: -35 m; Rödstensfjärden: -14 m). Alla rosor har samma färgskala men olika procentskalor.