UPTEC W05 011
ISSN 1401-5765

Examensarbete
M.Sc. Thesis Work

Mälarens vattennivå i ett framtida klimat

Water levels in Lake Mälaren in future climate scenarios

Karin Larsson

Februari 2005

Referat

Mälarens vattennivå i ett framtida klimat

Karin Larsson

Mälarens utlopp är reglerat för att kunna hålla vattenståndet inom acceptabla gränser. Trots regleringen översteg vattenståndet under vintern 2000/01 den högsta föreskrivna nivån i regleringsbestämmelserna. Studier som bedrivs på klimatforskningsavdelningen Rossby Centre på SMHI pekar på att det framtida inflödet till Mälaren kan komma att bli högre än vad det är idag, något som skulle innebära ännu högre vattennivåer i Mälaren. En omfattande översvämning av Mälarens stränder går bland annat ut över infrastruktur och bostäder. Problemet idag är att avbördningen genom sjöns utskov är för liten för att förhindra att översvämning uppstår. Att försöka skydda Stockholm mot vattnet med hjälp av skyddsmurar och invallning skulle bli alltför kostsamt. Ett bättre alternativ är istället att öka avtappningskapaciteten genom slussarna.

Syftet med det här arbetet var att undersöka hur vattennivån i Mälaren kan komma att bli i ett framtida förändrat klimat. I samband med detta gavs ett underlag för diskussioner om kommande utbyggnader av Mälarens utlopp för att kunna hålla vattennivån under vattendomens högsta föreskrivna nivå även vid ett högre framtida inflöde. Detta uppnåddes genom att genomföra analyser med historiska vattenståndsdata och genom att använda en beräkningsmodell för avtappning, Mälarmodellen, för simulering av ett antal framtida inflödessituationer. Arbetet har genomförts på uppdrag av SMHI.

Avtappningsmodellen återskapade de höga vattenstånden förhållandevis väl, medan det var svårare att bedöma hur precist den beräknade de allra lägsta vattennivåerna. Ett viktigt resultat från analysen med historiska data var att införandet av regleringen av Mälarens utlopp bidrog till att sänka de höga vattenstånden, men framförallt till att höja de låga. Ett annat resultat från studierna av historiska data var att vattenståndet i Östersjön antar högst nivåer under vintern. Detta i kombination med ett framtida högre inflöde till Mälaren under denna årstid indikerar att störst risk för översvämning kan komma att föreligga under vintern. För att säkert kunna hålla Mälarens vattennivå inom acceptabla gränser måste sjöns utlopp byggas ut. I alla scenarier som har undersökts i det här arbetet kan vattennivån hållas under den högsta föreskrivna nivån om avbördningen utökas till 1 370 m^3/s. Det krävs alltså nästan en fördubbling av dagens avbördningskapacitet på 710 m^3/s.

Nyckelord: Mälaren, inflödesscenarier, översvämning, vattennivå, vattendom, reglering, avbördning, sluss.

Institutionen för geovetenskaper
Avdelningen för Luft- och vattenlära
Villavägen 16
752 36 UPPSALA

ISSN 1401-5765

Abstract

Water levels in Lake Mälaren in future climate scenarios

Karin Larsson

The discharge from Lake Mälaren is regulated to keep the lake water level within limits set by a water decree. Despite this, in the year 2000 the lake water level rose above the upper limit. Studies conducted at the climate modeling unit Rossby Centre at the Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI) indicate that the inflow to the lake may increase in the future. A flood in the area will, among other things, strike infrastructure and residential districts.

The aim of this study was to investigate the water levels of Lake Mälaren in future climates. In addition to this possible future expansion of the lake discharge though the sluice gates in order to keep water levels below limits set by the water decree and to prevent flooding of the shoreline were discussed. This was done by examining past lake and sea water level data and by using a discharge model to simulate future lake water levels resulting from high future inflow. The study was commissioned by SMHI.

High lake water levels were reproduced fairly well by the discharge model, whereas it was more difficult to draw any coclusions concerning low lake water levels. The examination of data on past lake water levels demonstrated that the regulation of the lake discharge caused a reduction of the highest lake water levels, but above all an increase of low lake water levels. Data on past sea levels in the Baltic Sea showed high values during wintertime. In combination with future high inflow to Lake Mälaren during this season, this indicates that the greatest future flood risk may prevail during wintertime. The conclusion from the simulated future lake water levels was that the lake discharge needs to be expanded to prevent flood in the area. In all scenarios examined in this study, the lake water level will not rise above the upper limit set by the water decree if the discharge is increased to 1 370 m^3/s, which almost corresponds to a doubling of the existing discharge of 710 m^3/s.

Keywords: Lake Mälaren, inflow scenario, flood, water level, water decree, water regulation, water discharge, sluice gate.

Department of Earth Sciences
Air and Water Sciences
Villavägen 16
SE-752 36 UPPSALA

ISSN 1401-5765

FÖRORD

Detta examensarbete har genomförts inom projektet Seareg på uppdrag av klimatforskningsavdelningen Rossby Centre på SMHI under handledning av Gunn Persson. Ett stort tack vill jag rikta till henne för att hon gav mig möjligheten att genomföra ett spännande projekt och för att hon kommit med bra uppslag som har fört arbetet framåt.

Examensarbetet omfattar 20 poäng och har utförts inom civilingenjörsprogrammet i miljö- och vattenteknik, Uppsala universitet. Ämnesgranskare har varit Sven Halldin, avdelningen för Luft- och vattenlära, Institutionen för geovetenskaper, Uppsala universitet. Ett stort tack vill jag ge honom för mycket värdefulla synpunkter under rapportskrivandet.

Jag vill också tacka alla andra på SMHI som har hjälpt mig under arbetes gång. Speciellt vill jag rikta ett tack till Phil Graham för hjälp med att förstå hur klimatmodellering fungerar och till Carl Granström för förtydliganden av modelldata. Dessutom vill jag tacka Hans Bergström på Stockholms Hamn AB för vänligt bemötande och informativa svar på ställda frågor. Vidare vill jag tacka Geobiblioteket och Västerås stadsbibliotek för stor hjälpsamhet i samband med informationssökning.

Tack även till Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), SMHI, Samhällsbyggnadskontoret i Södertälje kommun, samt Stockholms gatu- och fastighetskontor respektive Stockholms stadsbyggandskontor i Stockholms stad för att jag fick använda deras figurer och kartor i mitt arbete.

Tack också till Anna N för att under arbetes gång ha kommit med bra tips, och till Anna H och Frida som har läst rapporten och kommit med mycket bra synpunkter.

Slutligen vill jag tacka min familj och särskilt min bror för att de alltid ställer upp i alla väder! Utan er hade det här examensarbetet inte kommit till.

Copyright © Karin Larsson och Institutionen för geovetenskaper, Uppsala universitet.
UPTEC W05 011, ISSN 1401-5765
Tryckt hos institutionen för Geovetenskaper, Uppsala universitet, Uppsala, 2005

1 INLEDNING 1

2 BAKGRUND 4

2.1 MÄLAREN 4
2.1.1 Mälarens avrinningsområde 4
2.1.2 Mälarens höjdsystem 5
2.2 MÄLARENS REGLERING 6
2.2.1 Historiskt sett 6
2.2.2 Dagens reglering 7
2.2.3 Sammanfattning av vattendomarna 9
2.2.4 Beslutsordningen på Stockholms Hamn AB 11
2.2.5 Dagens avbördningsförmåga 12
2.2.6 Planerade utbyggnader 12

3 MATERIAL OCH METODER 15

3.1 BERÄKNINGSMODELL FÖR AVTAPPNING 15
3.2 ANALYSER AV HISTORISKA DATA 19
3.2.1 Årliga variationer i vattennivå under 1900-talet 19
3.2.2 Samband mellan havsvattennivån och Mälarens vattenstånd 20
3.2.3 Vattendomens påverkan på Mälarens vattenstånd 21
3.2.4 1900-talets högst noterade vattenstånd 21
3.3 SCENARIER 21
3.3.1 Period med stor tillrinning till Mälaren 24
3.3.2 Period med liten tillrinning till Mälaren 24
3.3.3 Period med stor nederbörd över Centraleuropa 24

4 RESULTAT 27

4.1 SKILLNAD I VATTENNIVÅER 27
4.2 ANALYSER AV HISTORISKA DATA 28
4.2.1 Årliga variationer i vattennivå under 1900-talet 28
4.2.2 Samband mellan havsvattennivån och Mälarens vattenstånd 31
4.2.3 Vattendomens påverkan på Mälarens vattenstånd 32
4.2.4 1900-talets högst noterade vattenstånd 35
4.3 MÄLARENS VATTENSTÅND VID OLIKA INFLÖDESSCENARIER OCH AVBÖRDNINGAR 37
4.3.1 Dagens avbördningsförmåga 37
4.3.2 Avbördningsförmåga utökad till 1 010 m^3/s 39
4.3.3 Avbördningsförmåga utökad till 1 370 m^3/s 41
4.3.4 Avbördningsförmåga utökad till 1 500 m^3/s 43
4.3.5 Period med liten tillrinning till Mälaren 45
4.4 SAMMANFATTNING AV DE VIKTIGASTE RESULTATEN 46

5 DISKUSSION 48

6 SLUTSATS 52

7 VIDARE STUDIER 52

REFERENSER 53

Tryckta referenser 53
Internetreferenser 54
Muntliga referenser 55

BILAGA A 56

INTERVJUFRÅGOR TILL HANS BERGSTRÖM PÅ STOCKHOLMS HAMN AB 56

BILAGA B 57

AVBÖRDNINGSEKVATIONER FÖR MÄLARENS UTSKOV 57
BILAGA C 63
STATISTISKA BERÄKNINGAR 63

1 INLEDNING

Vattenståndet i Mälaren har varierat förhållandevis kraftigt under årens lopp, och redan på 1700-talet diskuterades åtgärder för att försöka skydda Stockholm mot översvämning (Jakobsson, 2003). Den högsta nivån under 1900-talet noterades år 1924 och uppgick till hela 545 cm i Mälarens höjdsystem[1]. Detta kan jämföras med att det idag eftersträvas att hålla medelvattenståndet på 415 cm (VBB VIAK, 2001). Ett behov fanns alltså redan tidigt att försöka kontrollera Mälarens utflöde till havet, men de första regleringsbestämmelserna som föreskrevs enligt en vattendom trädde dock inte i kraft förrän i början av 1940-talet (Ehlert, 1970). Idag regleras i stort sett allt utflöde från Mälaren till havet i olika utskov och genom reglering har det varit möjligt att stävja de högsta vattennivåerna. En fråga som kvarstår är ändå vilken påverkan vattendomen har haft på Mälarens vattenstånd. År 2000 uppmättes till exempel vattenståndet 473 cm, vilket är 3 cm över det högsta vattenstånd som föreskrivs i vattendomen (VBB VIAK, 2001). Dessa extra tre centimeter kan tyckas vara obetydliga, men vattnet var bara några decimeter från att rinna in i Gamla stans tunnelbanestation (Luthander, 2003). Dessutom stod låglänt terräng under vatten på flera av öarna i Mälaren (Sundström, 2004).

En omfattande översvämning skulle bland annat drabba vägar, järnvägar, tunnelbana, sjöfart, dricksvatten, avlopp och bostäder. Risk finns också för att el- och telefonförsörjning påverkas (Länsstyrelsen i Stockholms län, 2002). SMHI genomförde på uppdrag av Räddningsverket år 2001 en översiktlig översvämningskartering som visar de översvämningsdrabbade områdena vid vattennivåerna 480 cm respektive 563 cm (Räddningsverket, 2001). I Stockholms innerstad är det främst områdena vid Riddarfjärden som drabbas av översvämning. En annan plats som påverkas mycket om vattenståndet stiger är Solvalla travbana (Seareg, 2004b). Det höga vattenståndet år 2000 fick till följd att Västerås kommun började undersöka hur en översvämning skulle drabba staden. Kartor togs fram som visar hamnområdet i Västerås vid vattennivåer från 25 cm till 150 cm över medelvattenståndet (Seareg, 2004c). Redan vid nivån 50 cm över medelvattenståndet påverkas bostadsområdet Lillåudden. Vid nivån 125 cm över medelvattennivån ligger stora delar av Lillåudden och det nybyggda bostadsområdet Östra hamnen under vatten.

Problemet idag är att det inte går att avbörda en tillräckligt stor mängd vatten ut ur Mälaren för att förhindra att översvämning uppstår. Att försöka skydda Stockholm mot vattnet med hjälp av skyddsmurar, invallning och pumparbeten skulle bli alltför kostsamt (Seareg, 2004a). Ett bättre alternativ är istället att öka avtappningskapaciteten genom slussarna.

En utökad avtappningskapacitet måste inte bara kunna klara av dagens behov av avtappning, utan även morgondagens. Det framtida hydrologiska läget i Mälarregionen är någonting som undersöks på klimatforskningsavdelningen Rossby Centre på SMHI inom projektet Seareg – Sea level change affecting the spatial development in the Baltic Sea

[1] Höjd över kanten på den västra slusströskeln i Karl-Johansslussen. Höjdsystemets nollpunkt befinner sig 384 cm under Rikets höjdsystem 1900, RH00, (VBB VIAK, 2001) och 348 cm under Rikets höjdsystem 1970, RH70, (Räddningsverket, 2001) Se vidare avsnitt 2.1.2 Mälarens höjdsystem. Alla höjder i det här arbetet är angivna i Mälarens höjdsystem.

region. Hittills redovisade resultat pekar på att inflödet till Mälaren kan komma att förändras i framtiden. Flödena förväntas öka under hösten och vintern, för att under sommaren vara lägre än de är idag (Seareg, 2004b). Utskoven måste alltså vara dimensionerade så att de klarar av att hålla Mälarens vattenstånd på en acceptabel nivå även om inflödet ökar, men det är inte endast höga flöden som kan ställa till problem. Mälaren utgör dricksvattentäkt för ett stort antal människor och vid ett lågt vattenstånd bör regleringen kunna garantera att saltvatteninträngning inte sker. År 2003 genomförde SMHI på uppdrag av Stockholms Hamn AB en studie där det undersöktes om det fanns möjlighet att tidigarelägga avtappningen utan att risk för att alltför låga vattennivåer i sjön då uppstod (SMHI, 2003). Att tidigarelägga avtappningen innebär att redan vid vattenståndet 440 cm börja avbörda vatten genom de utskov som enligt vattendomen annars ska öppnas vid högre vattennivåer. Undersökningen visade dels att ingen överhängande risk för låga vattennivåer fanns, dels att de höga vattenstånden i Mälaren skulle ha sänkts med cirka en decimeter vid tidigarelagd avtappning. En annan undersökning som genomfördes av SMHI år 1997 på uppdrag av Länsstyrelsen i Stockholms län syftade till att ta reda på hur högt vattenståndet skulle ha blivit i Mälaren om den nederbörd som föll över Centraleuropa i juli månad 1997 istället skulle ha fallit över Mälarens avrinningsområde (SMHI, 1997). Vattenståndet skulle enligt denna beräkning ha stigit till 535 cm. Vidare har Länsstyrelsen i Stockholms län (2002) utrett behovet av en ökad avbördning från Mälaren. Resultatet från denna studie visade att det finns ett behov av att bygga ut Mälarens utlopp för att förhindra framtida översvämning.

Eftersom inflödet till sjön spelar en stor roll för dess vattenstånd är det viktigt att kartlägga hur både inflöde och vattenstånd har sett ut under 1900-talet. Kunskap om detta samband kan då användas till att dra slutsatser om Mälarens vattenstånd i framtida klimat då tillrinningen förväntas se annorlunda ut jämfört med idag. En annan faktor utöver inflödet som skulle kunna påverka vattenståndet i Mälaren är havsvattennivån, vilken även denna kan komma att kunna förändras i framtiden (Seareg, 2004a). Det är därför av intresse att studera variationer i havsvattennivå och undersöka påverkan av förändrad nivå. Stockholms Hamn AB har beräknat utsläppskapaciteten från Mälaren vid olika vattennivåer i sjön respektive havet (Bergström, muntligt besked, 2004). Enligt denna beräkning sjunker avbördningskapaciteten med ökande havsvattennivå. Sänkningen är speciellt uttalad vid låga vattenstånd i Mälaren.

Syftet med det här arbetet var att undersöka hur vattennivån i Mälaren kan komma att bli i ett framtida förändrat klimat. I samband med detta gavs ett underlag för diskussioner om kommande utbyggnader av Mälarens utlopp för att kunna hålla vattennivån under vattendomens högsta föreskrivna nivå även vid ett högre framtida inflöde. Detta uppnåddes genom att genomföra analyser med historiska vattenståndsdata och genom att använda en beräkningsmodell för avtappning, Mälarmodellen, för simulering av ett antal framtida inflödessituationer.

Avtappningsmodellen återskapade de höga vattenstånden förhållandevis väl, medan det var svårare att bedöma hur precist den beräknade de allra lägsta vattennivåerna. Ett viktigt resultat från analysen med historiska data var att införandet av regleringen av Mälarens utlopp bidrog till att sänka de höga vattenstånden, men framförallt till att höja

de låga. Från de historiska dataserierna gick det vidare att utläsa att en hög havsvattennivå sammanfaller med ett högt vattenstånd i Mälaren. För att säkert kunna hålla Mälarens vattennivå inom acceptabla gränser krävs en utökning av avbördningen från sjön. Resultaten från de fall som har studerats i det här arbetet visade att en utökning av avtappningen till 1 370 m^3/s, vilket innebär en utökning med 660 m^3/s, skulle klara av att hålla Mälarens vattenstånd under vattendomens högsta föreskrivna nivå på 470 cm.

2 BAKGRUND

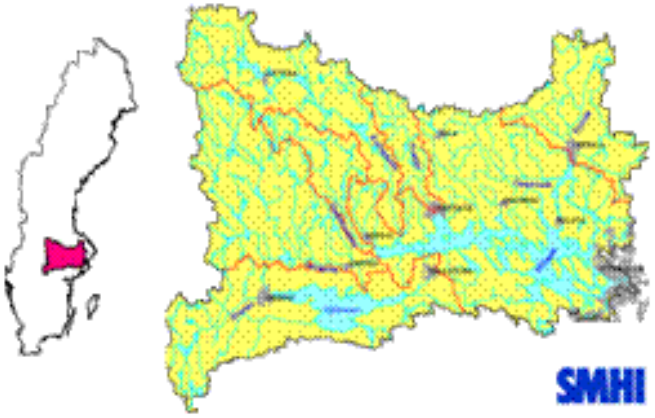
2.1 MÄLAREN

Mälaren är Sveriges till ytan tredje största sjö med en areal av 1 140 km^2 och sträcker sig 115 km i öst-västlig riktning och 65 km i nord-sydlig riktning. Sjön har ett maximalt djup på 66 m (Ehlert, 1970). Medeldjupet är 12,8 m, men på en yta motsvarande 20 % av sjöns totala area är vattendjupet mindre än 3 m (Seareg, 2004a). Sjöns medelvattenstånd är 415 cm i Mälarens höjdsystem (VBB VIAK, 2001). Detta vattenstånd utgör medelvärdet av vattenstånden i Stockholm, Södertälje och Västerås, som är de tre platser där sjöns vattenstånd mäts (SMHI, 2003). Havsvattennivån mäts vid Skeppsholmen (Granström, 2005, muntligt besked).

Mälaren utgör dricksvattentäkt för ungefär 1,5 miljoner människor, men fungerar även som recipient för dagvatten och för vatten från industrier och kommunala reningsverk (Mälarens vattenvårdsförbund, 2004). Vidare är Mälaren på grund av de natur- och kulturvärden som finns i området utpekat som riksintresse enligt Miljöbalkens fjärde kapitel (SFS, 1998). Detta innebär att turismens och friluftslivets, speciellt det rörliga friluftslivets, intressen särskilt ska beaktas.

2.1.1 Mälarens avrinningsområde

Mälarens avrinningsområde (figur 1) utgör 22 600 km^2 och sträcker sig 200 km i öst-västlig riktning respektive 100-150 km i nord-sydlig riktning. De angränsande avrinningsområdena utgörs bland annat av Dalälvens i norr, Klarälven/Vänerns i väster, Vätterns i sydväst och Nyköpingsåns i söder (Ehlert, 1970). Avrinningsområdet sammanfaller någorlunda väl med Norra Östersjöns vattendistrikt. Distriktet utgör ett av de fem vattendistrikt som Sverige delades in i då EG:s ramdirektiv för vatten genomfördes (Vattenportalen, 2004). Till Mälaren avvattnas större delen av Uppland, Västmanland, Närke, södra delen av Dalarna och norra Södermanland. Nästan hälften av tillrinningen kommer från de fyra stora åarna Arbogaån, Hedströmmen, Köpingsån och Kolbäcksån som alla mynnar ut i den västra delen av sjön (Mälarens vattenvårdsförbund, 2004). Ytterligare en fjärdedel av tillrinningen sker i västra Mälaren via Eskilstunaån, Svartån och Sagån. Norrifrån kommer drygt en tiondel av tillflödet genom Örsundaån och Fyrisån. Resten av tillrinningen, knappt en femtedel, kommer från små vattendrag.

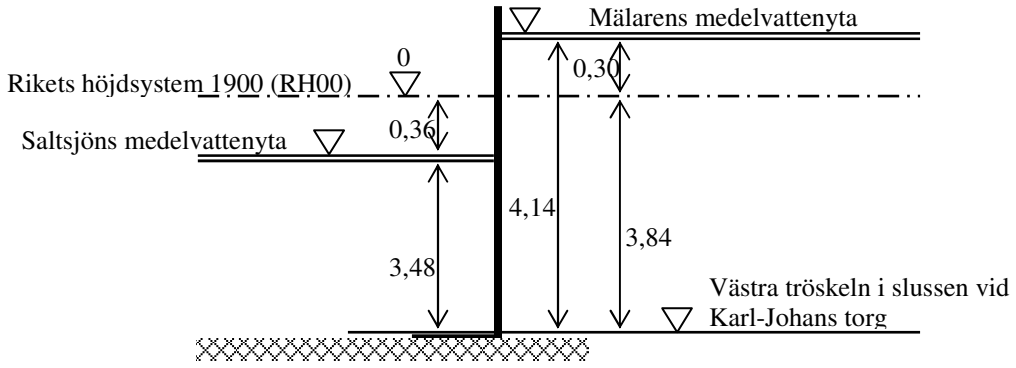


Figur 1. Mälarens avrinningsområde. Figur från SMHI.

Vattenföringen till Mälaren varierar både under året och geografiskt. Generellt sett sker högvattenföring under april-maj efter snösmältningen. Detta följs av en lågvattenperiod under sommaren och ett mindre högvatten under hösten. Vintern domineras återigen av en lågvattenperiod (Ehlert, 1970). Geografiskt går det att skönja skillnader mellan åarna i de västra delarna av Bergslagen, åarna på slätterna och åarna i öster. I Bergslagen råder ett något annorlunda klimat än i de övriga delarna av Mälarens avrinningsområde. Vintrarna i detta område är nämligen något längre och kallare, vilket medför att snö börjar lagras tidigare på hösten, och att snösmältningen börjar senare och pågår under en längre tid. Dessutom är avsmältningen under vintern mindre i Bergslagen än längre österut. Allt detta medför att åarna i väster har en förhållandevis lång och påtaglig vårflod, med ett maximum i månadsskiftet april-maj. Detta följs av ett lågvatten under sommaren, ett mindre högvatten under hösten och ett tydligt lågvatten under vintern innan vårfloden kommer igen. I de östliga åarna kommer vårfloden tidigare, omkring mitten av april. För åarna på slättlandet inträffar den till och med ännu tidigare. Eftersom en del av snön smälter redan på vintern, blir vårfloden inte särskilt stor. Vårfloden följs av lågvatten under sommaren, vars flöden vanligtvis är lägre än dem under vintern. Slutligen inträffar en höst- och/eller vinterflod som kan vara högre än vårfloden (Ehlert, 1970).

2.1.2 Mälarens höjdsystem

Mellan åren 1886 och 1905 genomfördes den första precisionsavvägningen avseende höjd i Sverige. Den fick namnet Rikets höjdsystem 1900, RH00, och omfattade 4 857 km. Antalet fixpunkter uppgick till ungefär 2 500 stycken (Lantmäteriet, 2004a). Medelhöjden av havsytan i Stockholm år 1900 fick utgöra RH = 0 (Lantmäteriet, 2004b). RH00 används fortfarande i till exempel Stockholms stad, varför systemet är av intresse att känna till när det gäller vattennivån i Mälaren. Mälaren har nämligen sitt eget höjdsystem (figur 2) vars nollnivå befinner sig 384 cm under nollnivån i RH00 och 348 cm under nollnivån i Rikets höjdsystem 1970, RH70.



Figur 2. Förhållandet mellan Mälarens höjdsystem och Rikets höjdsystem 1900. Alla mått är angivna i meter. Figuren är återskapad efter liknande figur i Stockholms Hamn AB (2000).

2.2 MÄLARENS REGLERING

2.2.1 Historiskt sett

Olika intressenter har sedan länge gjort anspråk på vatten och på de möjligheter som tillgång till vatten medför. Detta finns belagt redan i Västgötalagen från 1200-talet, där det står att läsa att om någon vill ”bygga en kvarn, må han icke bygga så, att en annan mans tomt skadas, ej hans åker eller äng, ej allmänna vägar, ej grannars förtå[2] och ej en kvarn, som förut varit byggd, ej fiskeverk.” (Jakobsson, 1999, s. 13)

Till grund för svensk vattenrätt har den så kallade strandägarrättsprincipen varit. Denna innebär i stort sett att den som äger strand besitter rätt att nyttja det vatten som strömmar förbi stranden. Efter hand utvecklades två olika riktningar av strandägarrättsprincipen. Den ena kallas principen om det naturliga flödet och innebär att ”Vatten strömmar och skall strömma, så som det alltid har strömmat.” (Jakobsson, 1999, s. 14). Den andra riktningen kallas principen om skäligt bruk och skulle under 1900-talets början komma att gynna framförallt vattenkraftsindustrin. Fram till dess försvarades principen om det naturliga flödet på flera sätt.

Redan på 1300-talet nyttjades dikning som en metod för att transportera bort överflödigt vatten, och dikessystemen blev allt mer utvecklade med tiden. Detta ledde naturligtvis till att det var viktigt att hålla dikessystemen och vattendragen öppna, för att förhindra att andras ägor översvämmades. Med andra ord var det viktigt att bevara principen om det naturliga flödet. Detta åstadkoms genom att i svensk vattenrätt inrätta den så kallade kungsådran, som nämns för första gången i en dom från 1442 (Jakobsson, 1999). Kungsådran motsvarade en tredjedel av det strömmande vattnet som skulle hållas fritt från byggnadsverk och annat som kunde störa flödet. Principen om det naturliga flödet förstärktes ytterligare år 1743 då det skrevs in i lagen att ingen fick upprätta byggnadsverk i vatten om dessa kunde medföra olägenheter för andra. Ungefär 140 år senare befästes samma princip återigen i 1880-års vattenrättsförordning. Sjösänkningar och torrläggningar hade lett till översvämningar, grundvattensänkning, erosion och försvunna våtmarker, och det var viktigt hålla vattendragen öppna. Fram till idag har sjösänkningar berört 2,5 % av landets totala antal sjöar (Jakobsson, 2003). Under 1800-talet uppgick antalet markavvattningsföretag till hela 30 000 stycken. Nu inleddes dock ett annat skede i svensk regleringshistoria (Jakobsson, 1999).

Vattenkraftsindustrin började växa sig stark och mäktig. Betydelsen av kungsådran såväl som av strandägarrättsprincipen började minska allt mer. Nu skulle älvarna och sjöarna tuktas. Slutligen upptogs år 1918 principen om skäligt bruk i svensk lag. Problemen med översvämningarna kvarstod dock, men redan på 1700-talet hade mer kunskap om vattensystemen börjat samlas in, något som behövdes om det skulle gå att skydda sig mot det strömmande vattnet. Vissa förslag på åtgärder var mer drastiska än andra. Ett exempel är höstfloden 1780, då broarna över Norrström i Stockholm rensades från byggnader, lösa pålar och kvarnar. Portarna i Söder sluss sågades sönder och försök gjordes att vid Södertälje skapa ett utlopp från Mälaren (Jakobsson, 2003). Kunskapen om de hydrologiska processerna var under slutet av 1700-talet inte de allra bästa, men ett antal

[2] Vall dit boskapen drivs, då den ska mjölkas (Svenska Akademiens ordbok, 2005).

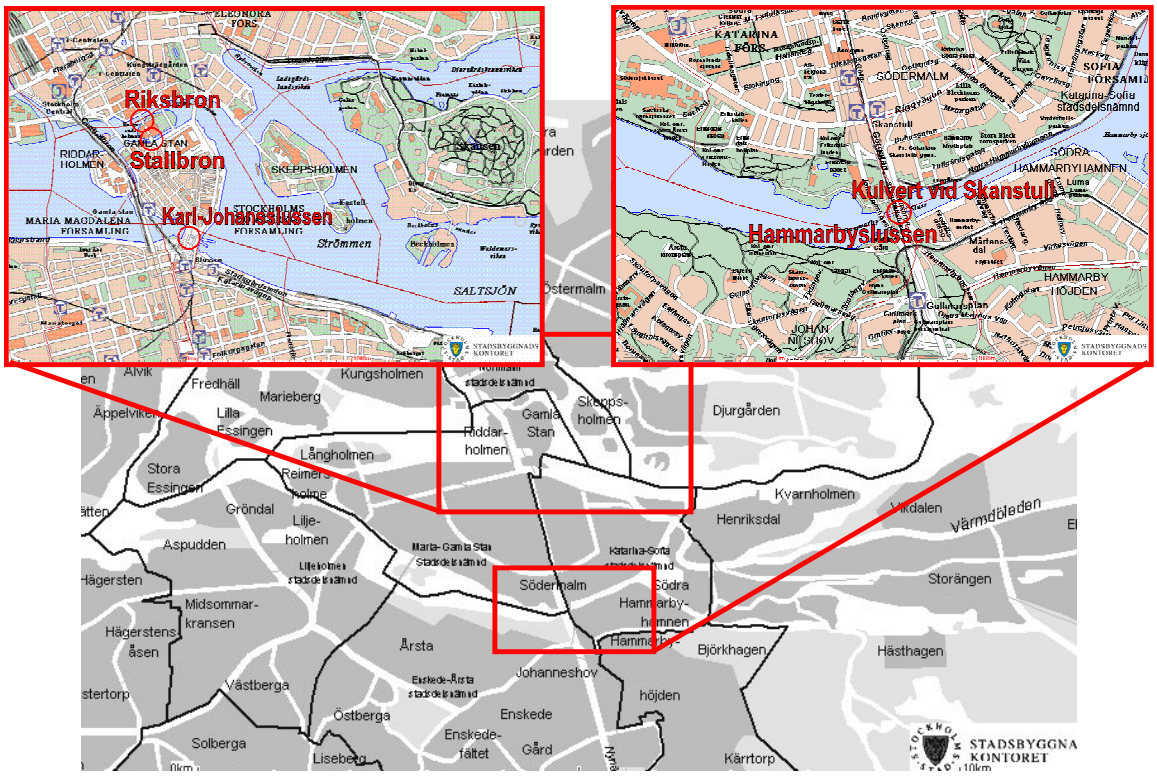
personer intresserade sig ändå för ämnet. År 1785 gav Johan Fischerström ut en skrift kallad *Utkast till beskrivning av Mälaren*. Fischerström menar att vattenstånden är ”föränderlige efter nederbörden och tillgångarnes ömnighet” (Jakobsson, 2003, s. 18). Han beskrev också avdunstningens påverkan på vattenståndet: ”…ty en fuktig och kulen luft updrager mångfaldigt mindre ångor, än en varm och klar väderlek.” (Jakobsson, 2003, s. 19). I mitten av 1800-talet försökte Nils Ericsson att närma sig problemet med översvämningarna i Mälaren. Han menade att dessa berodde på att Mälaren hade så många tillflöden, men endast ett utflöde, och kom således fram till lösningen att Norrström borde utvidgas (Jakobsson, 2003).

Ericsson presenterade härmed ett sätt att kontrollera Mälaren, men det rådde delade meningar om hur detta skulle genomföras. Ett förslag som togs fram år 1867 gick ut på att ”förvandla hela Mälaren till en vik af Saltsjön” (Jakobsson, 2003, s. 20). Denna plan stötte på många hinder och genomfördes inte. Den lösning vi ser idag härstammar från 1940 då en regleringsdamm sattes in under Riksbron. Detta var den första av regleringsdammar som kom att byggas i Stockholm, men den följdes inom kort av fler.

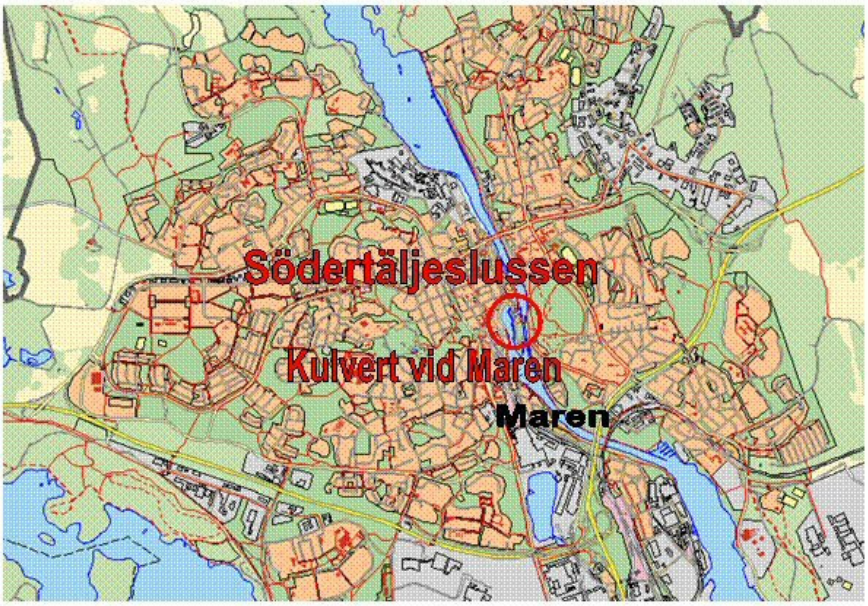
2.2.2 Dagens reglering

Regleringen av Mälaren har varit fullt utbyggd sedan 1968, och omfattar praktiskt taget hela dess utflöde[3]. Idag regleras Mälaren på ett flertal ställen i Stockholm (figur 3) och på två ställen i Södertälje (figur 4). Regleringsdammar finns dels vid Riksbron, dels vid Stallbron (Granström, 2003). Det område som i folkmun enbart kallas Slussen, eller ibland Söderströmsområdet, innefattar Karl-Johansslussen med tillhörande avtappningskanal (Persson, 2004, muntligt besked). Vidare regleras vattnet i Hammarbyslussen och i en kulvert vid Skanstull. I Södertälje regleras flödet i Södertäljeslussen och i en kulvert bredvid slussen ut till sjön Maren (Samuelsson, 1985). Denna kulvert står alltid öppen (Bergström, 2004, muntligt besked).

[3] Både Stockholm Vattens och Norrvattens vattenverk tar in vatten innanför slussarna och släpper ut det utanför dem (Abrahamsson, 2004, muntligt besked). Denna vattenmängd är alltså inte reglerad.



Figur 3. Mälarens olika utskov i Stockholm. Kartorna kommer från Stockholms stadsbyggandskontor (2004b).



Figur 4. Mälarens olika utskov i Södertälje. Kartan utgör ett utdrag ur tätortskarta från Samhällsbyggnadskontoret i Södertälje kommun (2004).

Idag är det Stockholms Hamn AB som har regleringsansvaret för Mälaren, vilket bland annat innebär att företaget har hand om slussöppningen (Bergström, 2004, muntligt besked). Även det praktiska arbetet när det gäller att öppna och stänga slussarna sköts av Stockholms Hamn AB, förutom när det gäller Södertäljeslussen med tillhörande avtappningskanal. Dessa två utskov sköts praktiskt av Sjöfartsverket.

2.2.3 Sammanfattning av vattendomarna

Mälarens reglering har bestämts av tre vattendomar. Beslut om den första regleringen togs 1941 och trädde i kraft 1943. Syftet med denna reglering var att förhindra översvämning och att höja lågvattenstånden till gagn för sjöfarten, med andra ord att jämna ut vattennivåerna. Det var även meningen att förhindra saltvatteninträngning från Saltsjön till Mälaren, eftersom vattenståndet i Mälaren ibland var lägre än det i Saltsjön (Ehlert, 1970). Regleringen fick dock inte avsedd effekt. Sänkningen av högvattenstånden blev förvisso ungefär den förväntade, men effekten på lågvattenstånden var inte acceptabel; saltvatten trängde fortfarande in i Mälaren. Därför fastslogs nya regleringsbestämmelser 1966. Dessa trädde i kraft 1968. Regleringen skulle den här gången sänka högvattenstånden ytterligare något, men framförallt höja lågvattenstånden. Den nu gällande vattendomen antogs 1989 (Dom 1989-10-20), men skiljer sig inte nämnvärt från 1966 års dom.

Regleringsbestämmelserna i 1966 års dom är följande (Ehlert, 1970):

> 1) Utspolsöppningen i dammen vid sjön Maren ska alltid hållas helt öppen.
>
> 2) När vattenståndet i Saltsjön är lika med eller högre än i Mälaren hållas samtliga utskov i Stockholm ävensom Karl-Johans-, Hammarby- och Södertäljeslussarna helt stängda, dock i beaktande av vad i mom 5 sägs om slussning.
>
> 3) När vattenståndet i Mälaren är högre än i Saltsjön gälla följande regler, dock med beaktande av vad som i mom 4, 5 och 6 säges om flödestappning, slussning, tappning vintertid genom Hammarby- och Södertäljeslussarna samt utspolning.
>
> a) Vid vattenstånd under 4,10 m hållas samtliga utskov i Stockholm och slussarna stängda. –Jämväl vid vattenstånd under 4,10 m må vid nedström överkanten av luckorna vid Riksbro- och Stallkanaldammarna hållas något under vattenytan för att åstadkomma överfall, varvid högst 2 miljoner m^3 i månaden får tappas.
>
> b) Vid vattenstånd mellan 4,10 och 4,20 m ska genom tappning i Riksbro- och Stallkanaldammarna eftersträvas att vattenståndet normalt hålles mellan 4,10 och 4,20 m.
>
> c) Vid vattenstånd högre än 4,20 m hållas Riksbro- och Stallkanaldammarna helt öppna.
>
> d) Vid vattenstånd högre än 4,25 m hållas avtappningskanalen vid Karl-Johans torg och kulverten vid Skanstull helt öppna.
>
> e) Vid vattenstånd högre än 4,50 m hålles Karl-Johansslussen helt öppen.
>
> f) Vid vattenstånd högre än 4,60 m hållas Hammarby- och Södertäljeslussarna öppna så mycket att normalt 70 m^3/s tappas genom vardera, dock med rätt för dem som handha skötsel av slussarna att så begränsa tappningen, att sjöfarten i Hammarbyleden och Hammarbyhamnarna samt i Södertälje kanal icke i större omfattning försvåras eller skada genom erosion uppstår.

4) Om på grund av riklig snötillgång eller stor nederbörd vattenståndet enligt kontrollantens beprövande befaras komma att stiga icke oväsentligt över 4,40 m äger denne, när frågan härom uppkommer, att Riksbro- och Stallkanaldammarna, avtappningskanalen vid Karl-Johans torg och kulverten vid Skanstull hållas öppna vid vattenstånd lägre än i mom 3 säges (flödestappning) dock ej under 4,00 m. Efter samråd med den som handha skötseln av slussarna äger kontrollanten, när risk för ett synnerligen högt flöde föreligger, även föreskriva, att Karl-Johans-, Hammarby- och Södertäljeslussarna hållas öppna vid vattenstånd lägre än i mom 3 säges, dock ej under 4,40 m.

5) När enligt mom 2 och 3 slussarna skola hållas stängda får dock för slussning erforderligt vatten tappas. Likaledes får vid nedström genom Hammarby- och Södertäljeslussarna vintertid tappas den vattenmängd, som är oundgängligen behövlig för att hålla portnischerna fria från is.

6) Stockholms stad äger att för utspolning inom hamnområdet i medeltal per, förutom normalt förekommande läckvatten och i mom 3 a angiven tappning, tappa 25 m^3/s vid vattenstånd 4,00 m eller däröver och 15 m^3/s vid lägre vattenstånd än 4,00 m.

7) Om tappning på grund av reparationsarbeten eller annan tillfällig orsak ej kan ske genom föreskrivet avlopp må motsvarande tappning ske i annat avlopp.

De i regleringsbestämmelserna angivna vattenstånden – med undantag för mom 2 – avse medeltalet av vattenstånden i Stockholm, Södertälje och Västerås.

De regleringsbestämmelser som ändrades i och med 1989 års dom är följande (Dom 1989-10-20):

3 b) Vid vattenstånd i Mälaren mellan 4,10 m och 4,20 m ska staden genom tappning i Riksbro- och Stallkanaldammarna hålla vattenståndet så nära 4,15 m som är lämpligt med hänsyn till dammarnas skötsel.

6) Staden får för utspolning inom hamnområdet tappa högst 7 m^3/s i medeltal för vecka inklusive den under mom 3 a i ovannämnda dom angivna tappningen om högst 2 miljoner m^3/mån.

Dessutom föreskriver Vattendomstolen följande tilläggsbestämmelser:

A) Den under mom 6 meddelade tappningsföreskriften må av länsstyrelsen i Stockholms län tillfälligt, helt eller delvis, upphävas därest så påkallas av sanitära skäl.

B) Staden ska täta bottenspalterna vid dammluckorna i Riksbro- och Stallkanaldammarna med rörlig tätning enligt redovisat förslag vid de tillfällen då vattenståndet i Mälaren är lägre än 4,05 m. Om bedömning eller prognos visar liten risk för fortsatt låg tillrinning får – efter samråd med kontrollanten – anbringandet av tätningen uppskjutas, dock längst tills vattenståndet når 4,00 m.

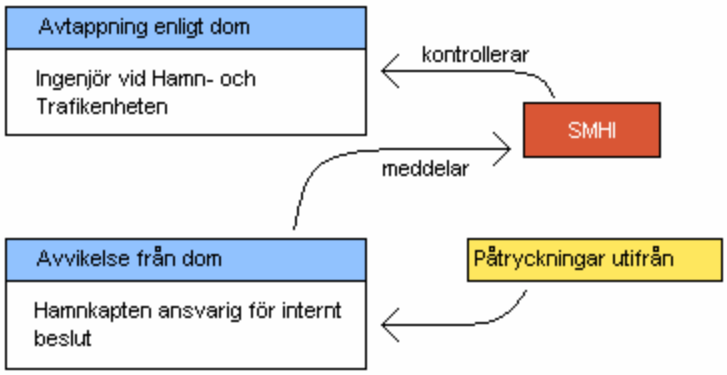
I vattendomen eftersträvas alltså att hålla vattenståndet i Mälaren som lägst 415 cm och som högst 470 cm. Värt att notera är att moment 4 ger kontrollanten, SMHI, rätt att efter samråd med regleringsansvarig, Stockholms Hamn AB, tillåta att Karl-Johans-, Hammarby- och Södertäljeslussen hålls öppna vid vattenstånd lägre än det föreskrivna om det finns risk för väldigt höga flöden. Vidare tillåter moment 5 slussning för fartygstrafik genom Södertälje kanal även vid de tillfällen då vattenståndet i Mälaren relativt Saltsjön är sådant att slussen i Södertälje annars skulle hållas stängd.

2.2.4 Beslutsordningen på Stockholms Hamn AB

Avsnittet bygger på en intervju med Hans Bergström på Hamn- och trafikenheten, Stockholms Hamn AB (bilaga A). Tonvikten i intervjun låg på hur beslutsordningen ser ut när vattendomen frångås (figur 5), vilket var fallet år 2000.

Stockholm Hamn AB har att följa de nivåer för slussöppning som anges i vattendomen, och kontrollanten, SMHI, ska se till att det sker. Om Stockholms Hamn AB dock befarar att en stor mängd nederbörd kommer att leda till en snabb stigning av Mälarens vattenstånd, med översvämningsrisk som följd, kan företaget besluta att öppna vissa av utskoven vid lägre vattenstånd än vad domen föreskriver. När vattnet väl stiger, stiger det nämligen ofta så hastigt att vattendomens nivåer fort passeras (Bergström, muntligt besked, 2004). Karl-Johansslussen ska enligt dom öppnas vid vattenståndet 450 cm, och slussarna i Södertälje respektive Hammarby är föreskrivna att öppnas vid vattenståndet 460 cm. Vattnet stiger dock fort mellan 450 cm och 460 cm, och eftersom Mälaren är en stor sjö handlar det om stora volymer vatten som måste tappas ut. Marginalerna är alltså små, varför det kan finnas anledning att frångå vattendomen.

År 2000 var ett år då vattendomen frångicks på flera sätt. Dels skedde avtappning genom Karl-Johans-, Hammarby- och Södertäljeslussen vid lägre vattenstånd än de föreskrivna, dels tappades en större volym vatten genom Hammarby- respektive Södertäljeslussen än vad som anges i domen. Moment 4 i vattendomen ger dock kontrollanten rätt att efter samråd med Stockholms Hamn AB tillåta att Karl-Johans-, Hammarby- respektive Södertäljeslussen hålls öppna vid vattenstånd lägre än de föreskrivna om det finns risk för väldigt höga flöden. I fallet år 2000 tillfrågades dock SMHI av Stockholms Hamn AB först efter det att företaget hade frångått domen. Vid sådana tillfällen då tappningen avviker från föreskrifterna är det hamnkaptenen i samråd med andra på Stockholms Hamn AB som fattar beslutet. Om tappningen sker enligt domen sköts den av Hans Bergström. Om tekniskt kunnande behövs, som i fallet då Hammarbyslussen öppnades mer än brukligt, tillfrågas även chefen för Tekniska avdelningen på Stockholms Hamn AB. Bergström (2004, muntligt besked) menar dock att det inte finns någon skriven rutin som anger att vissa myndigheter ska kontaktas om avvikelse från vattendomen görs.



Figur 5. Beslutsordningen på Stockholms Hamn AB gällande avtappningen från Mälaren vid avvikelse från vattendomens regler.

Den 1 november år 2000 uppgick Mälarens vattenstånd till 425 cm, varvid Stockholm Hamn AB beslutade att öppna Karl-Johansslussen helt, alltså att påbörja en tidigare avtappning. Vattnet fortsatte dock att stiga, vilket ledde till att också slussarna i Hammarby och Södertälje öppnades den 13 november. Vattenståndet uppgick då till 442 cm. Tio dagar senare kom även ett beslut om att avbörda en större mängd vatten i Hammarby än den föreskrivna volymen på 70 m^3/s. Slussportarna öppnades därför 3 m, vilket kan jämföras med att den normala öppningsbredden är ungefär 1 m. Den ökade avbördningen fick konsekvenser i form av erosionsskador och underminering nedströms. Åtgärderna var dock inte tillräckliga utan vattnet fortsatte att stiga. Således ökades den 28 november avbördningen även i Södertälje från föreskrivna 70 m^3/s till 120 m^3/s. En större avtappning än 120 m^3/s skulle enligt Bergström (2004) kunna skada brofundamenten på den nedströms liggande järnvägsbron. Besluten om tidigare och utökad tappning föregicks inte av samråd med SMHI.

SMHI informerades först den 7 november om att Karl-Johansslussen hade öppnats den 1 november. På SMHI:s inrådan väntade dock Stockholms Hamn AB med att öppna slussarna i Södertälje och Hammarby. Den 13 november kom en förfrågan från Länsstyrelsen i Stockholms län som gällde om inte slussarna kunde öppnas både i Södertälje och i Hammarby. En intern diskussion på Stockholms Hamn AB ledde då till att dessa utskov öppnades utan att kontrollanten tillfrågades. Enligt Bergström (2004) kan Stockholms Hamn AB öppna slussarna utan att kontrollanten samtycker. Trycket från bland annat media var stort och Länsstyrelsen blev nedringd av fastighetsägare i november och december år 2000. Många undrade varför inte alla utskov hade öppnats ännu tidigare.

2.2.5 Dagens avbördningsförmåga

Dagens slussar och avbördningsanordningar släpper ut 710 kubikmeter vatten per sekund vid maximal tappning (tabell 1). Kapacitet finns dock rent tekniskt för att i Hammarby- och Södertäljeslussen avbörda en större volym vatten än vad som faktiskt görs. Anledningen till att detta trots allt inte görs är att risk för stora erosionsskador då föreligger (VBB VIAK, 2001) och att brofundamenten på den nedströms liggande järnvägsbron i Södertälje riskerar att komma till skada (Bergström, 2004, muntligt besked).

2.2.6 Planerade utbyggnader

Tre olika alternativ avseende utökning av avtappningskapaciteten har behandlats i det här arbetet (tabell 1). Det första alternativet utgörs av ett ombyggnadsförslag för Slussenområdet, *Strömmar* (figur 6). Förslaget vann den formgivningstävling för ombyggnad av området som utlystes av Stockholms stad under sommaren 2003 (Stockholms Stad, 2004a). Avsikten med ombyggnaden av Slussenområdet var dock egentligen inte att utöka avbördningsförmågan utan att området är i väldigt dåligt skick och håller på att vittra sönder. *Strömmar* möjliggör en ökad avtappning med 300 m^3/s, alltså en avtappning utökad till 1 010 m^3/s. Enligt Seareg (2004b) innebär förslaget att den nuvarande Karl-Johansslussen med tillhörande avtappningskanal kompletteras med en ny kulvert.

Figur 6. Det vinnande arkitektförslaget Strömmar som har utarbetats av Nyréns arkitektkontor, Tyréns Stockholm och ELU Konsult. Bilden är ett fotomontage som visar hur Slussenområdet kommer att se ut efter ombyggnaden. Figuren är hämtad från Stockholms gatu- och fastighetskontor (2004a).

Det andra alternativet möjliggör en avbördning på 1 370 m^3/s och grundar sig på ett förslag som Länsstyrelserna i Mälardalslänen har lagt fram (Länsstyrelsen i Stockholms län, 2002). Enligt Länsstyrelserna finns det flera anledningar till att åtgärder avseende tappning måste vidtas. För det första visar Räddningsverket (2001) att det är rimligt att förvänta sig en maximal höjning av Mälarens vattenstånd med ungefär en meter över den högsta nivå som eftersträvas i vattendomen. Länsstyrelserna hänvisar för det andra till en rapport från Svenska kraftnät som visar att Vänerns nivå vid översvämningen hösten/vintern 2000/01 steg över det dimensionerande värdet enligt nuvarande riktlinjer[4]. Om det flöde som orsakade Vänerns översvämning istället hade kommit till Mälaren hade sjön och dess närområden drabbats av en omfattande översvämning (Länsstyrelsen i Stockholms län, 2002). För de tredje saknas ett dammskydd i Södertälje. Om alla fyra slussportar som finns där av någon anledning skulle stå i öppet läge samtidigt skulle det innebära totalstopp i sjötrafiken och stora erosionsskador nedströms portarna i Södertälje kanal. För att åstadkomma den utökade avtappningen på 1 370 m^3/s måste enligt Länsstyrelserna tre åtgärder vidtas (Länsstyrelsen i Stockholms län, 2002). Den första åtgärden går hand i hand med planer från Sjöfartsverket på att bygga om slussen i Södertälje och förstärka kanalen där för att på så sätt göra det lättare för sjötrafiken på Mälaren. Denna ombyggnad skulle öka avtappningen i Södertäljeslussen från dagens 70 m^3/s till 400 m^3/s. Åtgärden skulle kunna klara av att sänka det beräknade högsta vattenståndet i Mälaren med ungefär en halv meter. Den andra åtgärden berör Karl-Johansslussen med tillhörande avtappningskanal. Stockholms stad ämnar här utöka tappningen från dagens 260 m^3/s till 460 m^3/s (Länsstyrelsen i Stockholms län, 2002). Hur detta praktiskt skulle gå till blev något som ledde fram till formgivningstävlingen

[4] Flödeskommitténs riktlinjer för dimensionering av riskklass I-dammar, det vill säga dammar som vid dammbrott kan utgöra en icke försumbar risk för människoliv och en hög risk för omfattande skador på infrastruktur eller miljövärde. Ett dimensionerande flöde, eller högsta beräknade flöde, motsvarar flödet vid en ogynnsam kombination av magasinsinnehåll, snösmältning, markfuktighet och extrem nederbörd. Flödeskommittén grundades 1985 på initiativ av SMHI och vattenkraftsindustrin, och hade som uppgift att utarbeta förslag till riktlinjer för bestämning av högsta beräknade flöde för kraft- och regleringsdammar (Flödeskommittén, 1990).

som vanns av bidraget *Strömmar*. Ett krav som ställdes på bidragen var att en avtappningsökning med 200 m^3/s i förhållande till idag möjliggjordes. Den tredje och sista åtgärden berör slussen i Hammarby. Förutsatt att den förses med erosionsskydd skulle avtappningskapaciteten där kunna höjas från dagens 70 m^3/s till 200 m^3/s.

Tabell 1. De olika slussarnas och avbördningsanordningarnas nuvarande maximala avtappningskapacitet och avbördningskapaciteten hos de utökningar som har studerats i det här arbetet. Uppgifter om nuvarande avbördningskapacitet är hämtade från VBB VIAK (2001). Utökningen till 1 010 m^3/s motsvarar en avtappningsökning på 300 m^3/s, vilket möjliggörs i Slussenområdet efter ombyggnad enligt arkitekturförslaget *Strömmar*. Utvidgningen till 1 370 m^3/s innebär en ökning av avtappningen i Slussenområdet med 200 m^3/s, samt en utökning av avbördningen i Hammarby- respektive Södertäljeslussen med 130 m^3/s respektive 330 m^3/s. Utbyggnaden till 1 500 m^3/s åstadkoms genom att öka avbördningen i Slussenområdet med 200 m^3/s, genom ökad avbördning i Hammarby- respektive Södertäljeslussen med 130 m^3/s respektive 330 m^3/s och slutligen gnom ett tillägg av ytterligare ett utskov som avbördar 130 m^3/s.

Utskov	Avbördningskapacitet (m^3/s)			
	Nuvarande	Föreslagen kapacitet		
Riksbrofördämningen	200	200	200	200
Stallbrofördämningen	100	100	100	100
Slussen	260	560	460	460
Kulvert i Skanstull	5	5	5	5
Hammarbyslussen	70	70	200	200
Södertäljeslussen	70	70	400	400
Kulvert vid Maren i Södertälje	5	5	5	5
Ytterligare utökning				130
Totalt	710	1 010	1 370	1 500

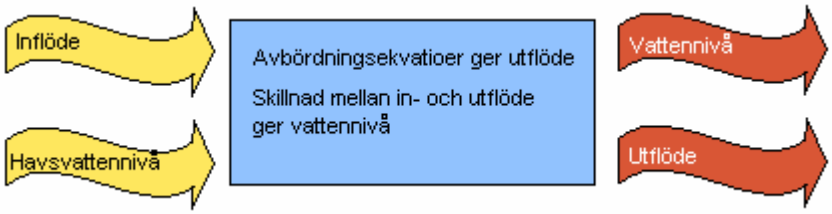
Det tredje och sista utbyggnadsalternativet som har behandlats i det här arbetet innebär en utbyggd avtappning till 1 500 m^3/s (Länsstyrelsen i Stockholms län, 2002). Enligt Länsstyrelserna utgör denna tappningsmängd det egentliga behovet av avtappning för att klara ett dimensionerat flöde enligt Flödeskommitténs riktlinjer**.** Det resulterande vattenståndet i Mälaren vid detta flöde skulle enligt beräkningar utförda av SMHI på uppdrag av Räddningsverket (2001) uppgå till 563 cm. Det bör noteras att den primära orsaken till ombyggnaden av Slussenområdet var att detta vittrar sönder. Möjligheterna till utökad avtappning blir en följd av detta.

3 MATERIAL OCH METODER

3.1 BERÄKNINGSMODELL FÖR AVTAPPNING

En modell för att relatera tappningsmängden genom de slussar som reglerar Mälarens vatten med vattenståndet i Mälaren har utvecklats av L. Phil Graham och Carl Granström, båda på SMHI. Det finns dock ingenting skrivet om denna modell. I fortsättningen benämns den Mälarmodellen (figur 7). Modellen kräver indata i form av inflöde till sjön, Q_{in} (m^3/s), och uppgifter om havsvattennivån, W_s (cm). Det är dessutom möjligt att ta med en förhöjd havsvattennivå i beräkningarna. Utflödet från Mälaren till Östersjön, Q_{ut} (m^3/s), ges av det sammanlagda utflödet genom slussarna. Öppning respektive stängning av var och en av dessa slussar styrs i sin tur av olika avbördningsekvationer (bilaga B). Förutom avbördningsekvationerna finns ytterligare ett villkor på varje sluss, nämligen vid vilken vattennivå i Mälaren som den ska öppnas. Denna vattennivå följer initialt vattendomen men är möjlig att ändra. Genom att reglera avtappningsmängden i slussarna ger Mälarmodellen som utdata olika värden på vattennivån i Mälaren, W_m (cm). Öppningsvillkoren för utskoven ger också ett värde på avbördningshastigheten från Mälaren till Östersjön. Modellens upplösning i tiden är ett dygn. Mälarmodellen möjliggör vidare en modifiering av vissa av de befintliga utskoven och ett tillägg av nya utskov. De utskov som kan ändras är slussarna i Hammarby och Södertälje, där slussportarnas öppningsbredder är variabla. Mälarmodellen beräknar vattenståndet i Mälaren på följande sätt:

- Tidsserier av Q_{in} och W_s läggs in som indata.
- Ett startvärde för W_m anges.
- Villkoren för slussöppning i avbördningsekvationerna för respektive sluss jämför $W_{s,n}$ med $W_{m,n}$, vilket för varje sluss ger ett värde på utflödet $Q_{ut,n}$.
- Det totala utflödet ges då av $Q_{ut,tot,n} = \sum Q_{ut,n}$.
- Skillnaden mellan in- och utflöde beräknas enligt $Q_{balans,n} = Q_{in,n} - Q_{ut,tot,n}$.
- En ny vattennivå i Mälaren ges då av $W_{m,n+1} = W_{m,n} + Q_{balans,n} * C$, där C är en korrektionsfaktor, i vilken Mälarens area ingår, som omvandlar $Q_{balans,n}$ från enheten m^3/s till cm/dygn.



Figur 7. Schematisk skiss över Mälarmodellen.

En utveckling som gjordes av modellen innan den började användas för beräkningarna i det här arbetet var att ange villkor på de olika utskoven så att de inte avbördade större vattenvolymer än vad som anges av deras maximala avbördningsförmågor (tabell 1), alltså att åstadkomma dagens maximala avbördning på 710 m^3/s. De utökade avtappningarna behandlades sedan på olika sätt. Villkoren på utskovens maximala avbördningsförmågor behölls dock i samtliga fall av utökad avtappning för de utskov som inte berördes av utbyggnad.

- I det fall då tappningen utökades till 1 010 m^3/s lades en extra sluss in i modellen. Slussens maximala avtappningskapacitet var 300 m^3/s och den styrdes av en ekvation liknande de andra slussarnas (bilaga B). Slussen hölls öppen vid vattenstånd högre än 460 cm, vilket är samma öppningsnivå som vattendomen föreskriver för Hammarby- respektive Södertäljeslussen.

- Utökningen av avbördningen till 1 370 m^3/s genomfördes på följande sätt. För det första adderades en sluss som så när som på en skillnad fungerade på samma sätt som i fallet med avtappningen 1 010 m^3/s. I detta fall ställdes dess maximala avtappningsförmåga istället in på 200 m^3/s. Precis som tidigare angavs dock att slussen skulle hållas öppen vid vattenstånd över 460 cm. För det andra ökades slussportarnas öppningsbredder i Hammarby- respektive Södertäljeslussen så att dessa maximalt tappade 200 m^3/s respektive 400 m^3/s.

- Den sista utökningen, det vill säga utökning av avtappningen till 1 500 m^3/s modellerades på precis samma sätt som utökningen av avtappning till 1 370 m^3/s sånär som på en skillnad. Den ytterligare avtappningen på 130 m^3/s tillskrevs den tillagda slussen, som nu alltså kom att tappa maximalt 330 m^3/s.

En variant av dessa avtappningsfall var att hitta det faktiska behovet av avbördning för att hålla Mälarens vattenstånd under 470 cm. För att göra det ökades slussportarnas öppningsbredder både i Hammarbyslussen och i Södertäljeslussen. Avbördningen justerades så att Mälarens vattennivå inte översteg 470 cm.

Mälarmodellen möjliggjorde dessutom att det gick att välja vid vilka vattennivåer som slussarna öppnades. Vissa av avbördningsfallen kombinerades därför med en tidigarelagd öppning av Karl-Johans-, Hammarby- respektive Södertäljeslussen. SMHI (2003) har utrett konsekvenserna av full tappning redan vid vattenståndet 440 cm. Därför har nivån 440 cm legat till grund för tappning vid lägre nivåer även i Mälarmodellen. Detta fall kombineras alltså med några av de andra fallen, då det endast innebar en specialhantering av vissa slussar och inte någon egentlig ny tappningsmängd.

Värden på inflöde bestod dels av observerat inflöde[5] under perioden 1901-2002 och dels av ett antal inflödesscenarier (tabell 2). Det första scenariot utgjordes av det observerade

[5] Det ”observerade” inflödet är beräknat med hjälp av vattennivåns ändring, utflödet och beräknad avdunstning från sjön. Utflödet ges av flödesserien Övre Stockholm (SMHI, 2003). Serien skapas av Stockholms Hamn AB vars modeller bygger på samma avbördningsekvationer som Mälarmodellen (Granström, 2005, muntligt besked).

inflödet med olika procentuella ökningar. Det andra inflödesscenariot bestod av observerat inflöde för alla årets månader under 1997 utom för juli månad. Inflödet under juli motsvarade istället det som inflödet skulle ha blivit om de stora nederbördsmängder som föll över Centraleuropa denna månad istället skulle ha fallit över Mälarens avrinningsområde. Det tredje scenariot utgjordes av framtida värden från modellen RCAO-E/A2[6] respektive RCAO-H/A2[7].

Tabell 2. De olika inflöden som har använts i Mälarmodellen.

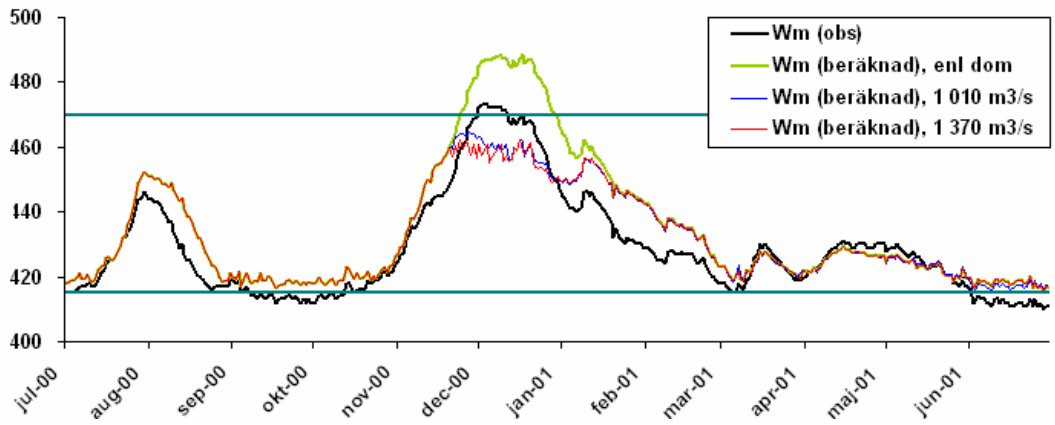
Inflöde
Observerat
Observerat med procentuell ökning
Observerat med nederbörd motsvarande Centraleuropa 1997 (beräknat på SMHI med HBV-modellen)
RCAO-E/A2
RCAO-H/A2

Den havsvattennivå som används som indata i samtliga fall, alltså även i de fall då inflödet kom från RCAO-E/A2 respektive RCAO-H/A2, var uppmätt av Stockholms Hamn AB och var alltså reell. För att ytterligare kunna undersöka samvariationen mellan havsvattennivån och Mälarens vattenstånd togs även en förhöjd medelhavsvattennivå på 46 cm med i beräkningarna. Denna nivå var uträknad av Meier m fl (2004). Mälarmodellen användes alltså med ett flertal olika kombinationer av indata och avbördningar för att studera Mälarens nivå (tabell 4). Dessutom valdes olika intressanta tidsperioder ut.

För att få en uppfattning om hur modellen behandlade de olika avtappningsvarianterna undersöktes resulterande vattennivå med avbördningarna 710 m^3/s, det vill säga dagens avbördningsförmåga och med utökad avbördningsförmåga dels till 1 010 m^3/s och dels till 1 370 m^3/s (fall 1 – 3 i tabell 4) för perioden 1 juli 2000 – 30 juni 2001 (tabell 3). Som indata användes observerat inflöde.

[6] Beteckning för kombinationen av modellerna RCAO, ECHAM4/OPYC3 och utsläppsscenario A2. Se vidare avsnitt 3.3 Scenarier.

[7] Beteckning för kombinationen av modellerna RCAO, HadAM3H och utsläppsscenario A2. Se vidare avsnitt 3.3 Scenarier.



Figur 8. Observerat och beräknat vattenstånd i Mälaren med observerat inflöde som indata till Mälarmodellen i kombination med olika avbördningsalternativ. Vattennivån är angiven i centimeter i Mälarens höjdsystem.

Mälarmodellen visade att stor skillnad i vattenstånd rådde mellan uppmätta värden och de värden som beräknades om tappningen skedde enligt vattendomen, det vill säga om utskoven öppnades vid de vattenstånd som anges i domen (figur 8). Orsaken till detta var att vattendomen frångicks under denna tidsperiod för att förhindra hotande höga vattenstånd. Ingen hänsyn togs dock till detta faktum vid fortsatt användning av modellen, och inga försök gjordes heller för att anpassa modellen efter de verkliga tappningsförhållanden som rådde år 2000/01. Anledningen till detta var att avvikelsen från vattendomen dessa år utgjorde en unik händelse som med största sannolikhet inte kommer att upprepas på samma sätt en gång till. Det är dock värt att hålla i minne när vattennivån som har simulerats fram med scenariodata som indata jämförs med uppmätta värden. Det är möjligt att en mer rättvis jämförelse erhålls om simulerade vattennivåer i Mälaren jämförs med nivån 2000/01 om avtappningen denna period hade följt vattendomen. Troligt är dock att vattendomen kommer att frångås vid framtida liknande händelser som år 2000/01, och att avtappningen då kommer att överskrida den maximala avbördning som föreskrivs i domen.

Tabell 3. Beräknad högsta respektive lägsta vattennivå i Mälaren vid observerat inflöde i kombination med olika avbördningsalternativ för perioden 2000 – 2001. Tabellen visar även uppmätt vattennivå i Mälaren under samma tidsperiod.

Inflöde (m^3/s)	Avtappning enligt dom eller tidigarelagd	Avbördning (m^3/s)	Havsvattennivå över uppmätt (cm)	Högsta nivå (cm)	Lägsta nivå (cm)
Q_{in} (obs)	Enligt dom	710	0	488	415
Q_{in} (obs)	Enligt dom	1 010	0	465	415
Q_{in} (obs)	Enligt dom	1 370	0	462	415
			Uppmätt vattennivå	473	411

Modellen har kontrollerats av L. Phil Graham och Carl Granström så att den inte ska vara numeriskt instabil. Ingen kontroll avseende numerisk stabilitet har dock gjorts av tillägget av en ny sluss i kombination med ökningen av slussportarnas öppningsbredder i Hammarby- respektive Södertäljeslussen.

3.2 ANALYSER AV HISTORISKA DATA

3.2.1 Årliga variationer i vattennivå under 1900-talet

Vattenståndet både i Mälaren och i Östersjön varierar med årstiderna. Ett sätt att signifikant skilja vattenståndet under de olika årstiderna åt var att genomföra ett ANOVA-test (bilaga C). ANOVA – Analysis of Variance – kan nämligen användas för att undersöka hypotesen att medelvärdena mellan k antal mätserier är lika stora (Johnson, 2000). När det gällde Mälaren delades året in i fyra mätserier, en för varje årstid. Vintern representerades av december – februari, våren omfattade mars – maj, sommaren inkluderade juni – augusti och slutligen innefattade hösten september – november. För var och en av dessa årstider beräknades ett medelvärde på vattenståndet i Mälaren utgående från dygnsvärden för varje dag från 1 december 1901 till 30 november 2002. Därefter genomfördes själva ANOVA-testet. Som nollhypotes angavs att ingen signifikant skillnad fanns mellan de fyra medelvärdena, varefter beräkningarna genomfördes med 95 % konfidensintervall (bilaga C). Det var även av intresse att kunna rangordna de fyra medelvärdena (bilaga C), något som lät sig göras med hjälp av ekvation 1 (Johnson, 2000). Sambandet beskriver ett konfidensintervall I för de studerade medelvärdena. Om noll ligger inom det framräknade intervallet är skillnaden mellan medelvärdena μ_1 respektive μ_2 inte statistiskt signifikant.

$$I = (\mu_1 - \mu_2) \pm t_{\alpha/2} \sqrt{MSE\left(\frac{1}{n_1} - \frac{1}{n_2}\right)} \qquad (1)$$

De medelvärden som jämförs betecknas μ_1 respektive μ_2. Det tabulerade värdet för t-fördelningen på konfidensnivån α betecknas $t_{\alpha/2}$. MSE motsvarar variansen och hämtas från ANOVA-testet. Slutligen betecknas antalet observationer i de jämförda mätserierna n_1 respektive n_2.

Havsvattennivån undergår mycket stora fluktuationer men trots detta gjordes ett försök att finna en regelbundenhet i dess variation. Ett medelvärde för varje dygn under tidsperioden 1901-2002 beräknades. Till skillnad från beräkningarna gällande variationerna i Mälarens vattenstånd delades året när det gällde Östersjöns vattennivå in på två olika sätt. För det första nyttjades samma indelning som för Mälaren, men för det andra gjordes indelningen på följande sätt för att ytterligare försöka minska variationen i vattennivån. Endast månader vars dygnsmedelvärden uppvisade en någorlunda stabil havsvattennivå inkluderades i beräkningarna. Det beaktades också att det förväntade resultatet är att havsvattennivån är låg på våren men hög på hösten och vintern (Broman, 2004, muntligt besked). Detta beror på att en av de avgörande faktorerna för havets nivå är lufttrycket, som är högre på våren än vad det är under hösten och vintern. Med dessa två förutsättningar i minne kom då vintern endast att representeras av december och januari. Nästa period omfattade april – juni och benämndes vår/försommar. Avslutningsvis fick hösten omfatta månaderna september – november. Under årets övriga månader skedde så stora förändringar med vattennivån i havet, så att dessa skulle störa resultatet om de togs med i beräkningarna. Efter det att medelvärdena var framräknade

för de två olika indelningarna av året behandlades de på precis samma sätt som medelvärdena för Mälarens vattennivå. Om det fanns någon statistisk skillnad mellan medelvärdena undersöktes alltså med ANOVA-test, varefter värdena rangordnades.

3.2.2 Samband mellan havsvattennivån och Mälarens vattenstånd

För att undersöka om det finns ett statistiskt samband mellan vattennivån i Östersjön och vattennivån i Mälaren användes Pearsons korrelationskoefficient. Metoden bygger på antagandet att både vattennivån i Mälaren och i Östersjön kommer från normalfördelade grupper av värden, men vid stora datamängder är antagandet av mindre betydelse. Nollhypotesen, H_0, innebär att det inte finns något tecken på korrelation mellan dataserierna, men det kan ändå finnas korrelation. Korrelationskoefficienten r beräknas med hjälp av ekvation 2 (Djurfeldt m fl, 2003).

$$r = \frac{\sum xy - \frac{\left(\sum x\right)\left(\sum y\right)}{n}}{\sqrt{\left(\sum x^2 - \frac{\left(\sum x\right)^2}{n}\right)\left(\sum y^2 - \frac{\left(\sum y\right)^2}{n}\right)}} \qquad (2)$$

Värdena från den ena serien betecknas x och värdena från den andra betecknas y. Antalet oberoende observationer benämns n. Testet kan antingen vara en- eller tvåsidigt, men i det här arbetet användes endast det tvåsidiga testet. Antalet frihetsgrader är då $n-2$. Det beräknade r-värdet jämförs med ett tabulerat värde för vald signifikansnivå och antal frihetsgrader. I alla beräkningar i detta arbete var det tabulerade r-värdet 0,195, vilket motsvarar värdet för signifikansnivån $\alpha = 0{,}05$ och fler än 100 frihetsgrader (Djurfeldt m fl, 2003). Om det beräknade värdet är större än det tabulerade kan nollhypotesen förkastas. Om det beräknade r-värdet däremot är mindre eller lika med det tabulerade kan nollhypotesen accepteras. Korrelationskoefficienten antar ett värde mellan -1 och 1, där -1 motsvarar ett fullständigt negativt samband och 1 ett helt positivt samband. En koefficient som är noll innebär att inget bevis för samband finns mellan de undersökta mätserierna (Djurfeldt m fl, 2003).

MSExcel hade en särskild funktion för att beräkna korrelationskoefficienten (bilaga C)**.** De två mätserierna bestod av uppmätt havsvattennivå i Östersjön och uppmätt vattenstånd i Mälaren. Varje dygn representerade en datapunkt. Tre olika fall med avseende på den undersökta tidsperiodens längd valdes ut. För det första jämfördes de olika vattennivåerna för hela 1900-talet, närmare bestämt för perioden 1 januari 1901 – 30 september 2003. I de två sista fallen togs hänsyn till om Mälaren var reglerad eller inte. Det första av de sista fallen innefattade tidsperioden 1 januari 1901 – 30 december 1942, alltså den tidsperiod då regleringen av Mälaren ännu inte hade trätt i kraft. Den sista tidsperioden omfattade åren 1 januari 1943 – 30 september 2003, åren efter det att regleringen trädde i kraft.

3.2.3 Vattendomens påverkan på Mälarens vattenstånd

Mälarens vatten har varit reglerat under ungefär hälften av 1900-talet. Trots det fanns det ett sätt att skaffa sig en uppfattning om hur regleringen har påverkat vattenståndet i Mälaren under den period då utloppet inte var reglerat. Bland år med naturligt vattenflöde valdes två längre tidsperioder ut för reglering. Den ena perioden omfattade åren 1903 – 1916 och innehade flera på varandra följande år med höga vattennivåer. Den andra perioden utgjordes av åren 1932 – 1942 och representerade en följd av år med lågt vattenstånd i sjön. Båda dessa perioder reglerades på flera olika sätt (fall 50 – 57 i tabell 4).

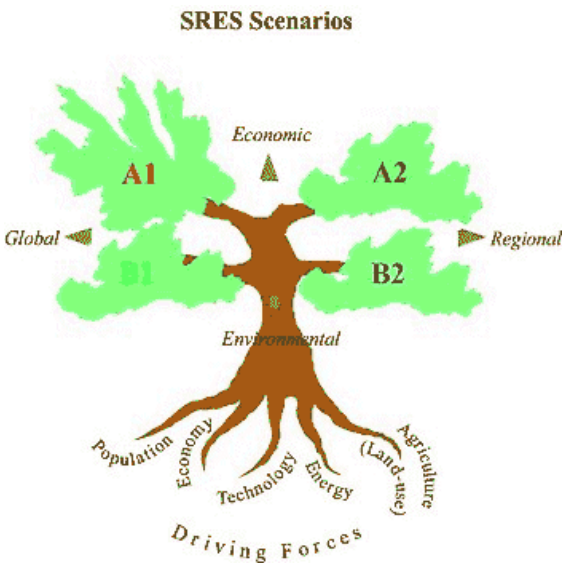
3.2.4 1900-talets högst noterade vattenstånd

1900-talets allra högsta vattenstånd noterades under 1924. Därför studerades perioden 1 januari 1924 – 31 december 1925 lite närmare. Åren utgjorde ett verkligt exempel då Mälarens vattenstånd var högt och då översvämning faktiskt inträffade. Förutom de höga vattennivåerna uppträdde även mycket låga sådana. En annan anledning till att denna period valdes ut var att den utgjorde en bra tid för att studera samspelet mellan havsvattennivån och vattennivån i Mälaren. På grund av landhöjningen som är ungefär 40 cm på 100 år (Persson, 2005, muntligt besked) befann sig havsvattennivån högre upp i början av 1900-talet än den gör idag.

3.3 SCENARIER

Klimatmodellering grundar sig på scenarier som utgör en bild av hur framtiden kan komma att utvecklas. Trots att det är högst osannolikt att varje enskild del som beskrivs i scenarierna verkligen kommer att inträffa utgör de en hjälp för klimatmodellering och möjliggör en bedömning av påverkan och förslag på adekvata åtgärder (Nakićenović, 2000). Special Report on Emissions Scenarios (SRES) från FN:s klimatpanel (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) beskriver framtida utvecklingsscenarier och förutser utsläppet av växthusgaser relaterade till dessa (Nakićenović, 2000). SRES-scenarierna delas in i fyra grupper, A1, A2, B1 och B2 som var och en följer en utvecklingsväg. Enligt Nakićenović (2000) kan utvecklingsvägen ses som en samling gemensamma drag som scenarierna inom varje grupp delar. De fyra grupperna av scenarier kan illustreras med hjälp av ett träd (figur 9).

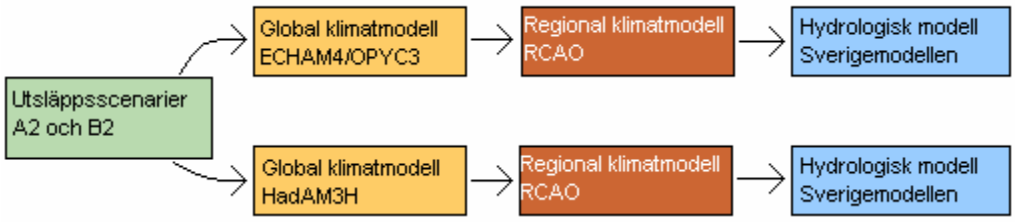
I A2-gruppen går utvecklingen av alternativa energikällor ganska långsamt och fossila bränslen fortsätter att utgöra den huvudsakliga energikällan. Allt eftersom tillgången på olja och naturgas minskar ökar istället användandet av kol som energikälla. I det scenario som befinner sig i ”mitten” av A2-gruppen fyrfaldigas koldioxidhalten i atmosfären fram till år 2100 jämfört med 1990 års värden. I B2-scenariot sker en viss utveckling av alternativa energikällor. Trots detta stiger koldioxidhalten på grund av befolkningstillväxt och ökad inkomst per capita, (Nakićenović, 2000).



Figur 9. Trädet visar varje scenariogrupps utveckling mot antingen ekonomisk eller miljömässig hänsyn i kombination med antingen global eller regional utveckling. Varje grupp förgrenar sig för att illustrera att alternativa scenarier existerar inom den. Figuren är hämtad från Intergovernmenal Panel on Climate Change.

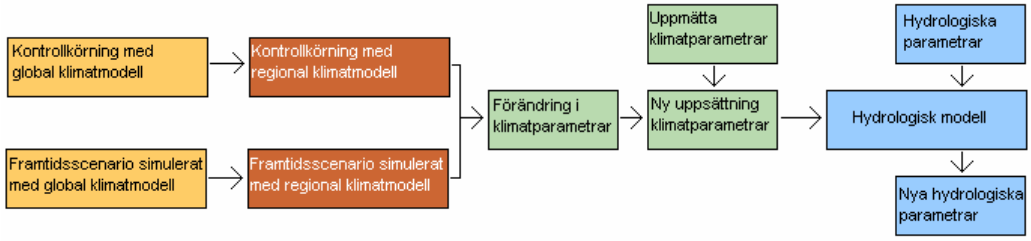
Den hydrologiska modell varifrån scenariedata i det här arbetet kommer kallas Sverigemodellen och har utvecklats på SMHI (Andréasson m fl, 2004). Modellen bygger på HBV-modellen[8] och har relativt hög upplösning eftersom den delar in landet i över 1 000 avrinningsområden. Indata till Sverigemodellen avseende olika klimatparametrar kommer från en regional klimatmodell som har utvecklats på Rossby Centre på SMHI. Den modellen heter Rossby Centre Atmosphere – Ocean model (RCAO) och är uppbyggd av Rossby Centre Regional Atmosphere Model (RCA) och Rossby Centre Regional Ocean Model (RCO) (SMHI, 2005c). Randvillkoren för RCAO består i sin tur av data från två olika globala klimatmodeller. Dessa är HadAM3H som har utvecklats vid Hadley Centre i Storbritannien och ECHAM4/OPYC3 som har tagits fram på Max Planckinstitutet för meteorologi i Tyskland (Graham, 2004). De globala klimatmodellerna drivs bland annat av SRES utsläppsscenarier. SMHI använder indata från de båda globala klimatmodellerna i de fall då de har kombinerats med utsläppsscenario A2 och B2 (figur 10). I det här arbetet användes dock endast data som bygger på utsläppsscenario A2. Kombinationen av RCAO, ECHAM4/OPYC3 och utsläppsscenario A2 kallas hädanefter RCAO-E/A2. Kombinationen av RCAO, HadAM3H och benämns i fortsättningen RCAO-H/A2.

[8] HBV-modellen är en nederbörds-avrinningsmodell som utvecklades på SMHI i början av 1970-talet. Modellen kan bland annat ta hänsyn till lokala variationer i höjd, sjöarea och vegetation i ett område (SMHI, 2005b). Namnet HBV kommer från Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning, en tidigare organisatorisk del av SMHI (2005a).



Figur 10. Indata till detta arbete kommer från Sverigemodellen som i sin tur får indata från klimatmodeller.

I modelleringarna med RCAO har framtida klimatdata tagits fram med hjälp av så kallade tidssnitt (eng *time-slice*). Istället för att starta med dagens klimat och stega framåt i tiden, har begränsade tidsperioder tagits från de globala klimatmodellerna; en period för dagens klimat och en period för den tid som ska representeras av klimatscenariot. Den regionala klimatmodellen har alltså i detta fall endast körts för dessa utvalda perioder och inte för en lång tidsserie (Persson, 2003). Dagens klimat – kontrollkörningen – representeras av åren 1961 – 1990 och framtidsscenariot beskriver åren 2071 – 2100 (Graham, 2004). Förändringar i temperatur, nederbörd och avdunstning mellan kontrollkörningen och framtidsscenariot appliceras sedan på en serie med nuvarande uppmätta klimatförhållanden. Den förändrade serien används därefter som indata i HBV-modellen (figur 11). Metoden att addera förändringar i olika klimatdata till en databas som innehåller observerade klimatdata, och att sedan använda den modifierade databasen som indata i en hydrologisk modell – i detta fall Sverigemodellen – för att beskriva framtida hydrologiska förhållanden kallas Δförändring (eng *delta change*) (Graham, 2004). Åren i scenarierna motsvarar alltså verkliga år på följande sätt: de klimatologiska förhållanden som rådde under ett visst inträffat år behölls även under motsvarande år i scenarierna, men under detta år adderas även en ändring i klimatologiska parametrar (Graham, 2005, muntligt besked). Detta innebär alltså att till exempel år 2000 benämns år 2000 även i scenarierna.



Figur 11. Metod för att ta fram nya hydrologiska parametrar som ett resultat av en simulerad klimatförändring. Figuren är återskapad efter liknande figur i Andréasson m fl (2004).

3.3.1 Period med stor tillrinning till Mälaren

Perioden 1 juli 2000 – 30 juni 2001 var intressant av tre anledningar. För det första var detta den period som i båda RCAO-scenarierna uppvisade högst inflöde till Mälaren. För det andra överskred vattennivån i Mälaren med tre centimeter det högsta rekommenderade vattenståndet enligt vattendomen. För det tredje frångicks domen i och med att vatten började avtappas genom vissa slussar vid lägre vattenstånd än föreskrivet.

Under denna tidsperiod undersöktes även Mälarens vattennivå vid olika procentuella ökningar av inflödet eftersom perioden redan uppvisade ett stort inflöde. Dessa påslag på inflödet skulle approximera olika nederbördssituationer och var tänkt som en känslighetsanalys av Mälaren. Mälarens vattenstånd vid fem olika nederbördssituationer som skiljer sig från dagens nederbörd undersöktes. Ett par viktiga antaganden gällande hydrologiska samband gjordes. För det första antogs att systemet var mättat efter en tids regnande. Givet ett mättat system antogs för det andra att all nederbörd ger avrinning. Dessa två antaganden leder då till att en ökning av nederbörden motsvaras av en lika stor ökning av inflödet till Mälaren. De fem olika nederbördssituationerna utgjordes av ett procentuellt påslag i steg om 10 % på inflödet till Mälaren. En ökning skedde alltså med 10 %, 20 %, 30 %, 40 % respektive 50 %. Den förhöjda nederbörden har dock inte lagts på alla dagar. Endast de dagar då vattenståndet i Mälaren var högre jämfört med föregående dag men lägre jämfört med påföljande dag har erhållit en ökad nederbörd. Valet av dagar som fick mer nederbörd grundade sig alltså på derivatan av kurvan som beskriver Mälarens vattenstånd. Metoden valdes alltså så att det gick att förstärka nederbörden när den redan var stor men lämna den opåverkad i övrigt.

3.3.2 Period med liten tillrinning till Mälaren

För åren 1995 – 1996 fanns både enligt RCAO-E/A2 och enligt RCAO-H/A2 en period med lågt inflöde till Mälaren under en lång tid. Under denna period var det alltså möjligt att studera om regleringen i slussarna kunde hålla vattennivån uppe trots att tillrinningen var knapp.

3.3.3 Period med stor nederbörd över Centraleuropa

Under juli 1997 föll stora mängder nederbörd över Centraleuropa, vilket bland annat resulterade i översvämningar av floden Oder. SMHI (1997) fick av Länsstyrelsen i Stockholms län i uppdrag att undersöka hur Mälarens nivå skulle påverkas av en liknande nederbördssituation över Mälarens avrinningsområde och beräkna den resulterande vattennivån i Mälaren. SMHI utförde sina beräkningar med HBV-modellen. Baserat på nederbörd, utflöde och framräknat vattenstånd i denna av SMHI genomförda studie beräknades i det här arbetet ett nytt inflöde till Mälaren under juli. Inflödet under juli är beräknat med hjälp av vattenbalansen som beskrivs av ekvation 3.

$$Q_{in} = Q_{ut} + A(E - P) + A(dh/dt) \tag{3}$$

Inflöde respektive utflöde betecknas Q_{in} (m^3/s) respektive Q_{ut} (m^3/s), E (mm/dygn) motsvarar avdunstningen och P (mm/dygn) nederbörden över sjön. A (km^2) är sjöns

area och dh/dt (m/dygn) betecknar ändringen i vattennivå. Avdunstningen var liten i förhållande till de andra termerna och försummades därför i beräkningarna.

Tabell 4. Studerade kombinationer av inflöde, havsvattennivå och avbördning med Mälarmodellen.

Fall	Tidsperiod (årtal)	Inflöde (m^3/s)	Avtappning enligt dom eller tidigarelagd	Avbördning (m^3/s)	Havsvattennivå över uppmätt (cm)
1	2000 – 2001	Q_{in} (obs)	Enligt dom	710	0
2	2000 – 2001	Q_{in} (obs)	Enligt dom	1 010	0
3	2000 – 2001	Q_{in} (obs)	Enligt dom	1 370	0
4	2000 – 2001	RCAO-E/A2	Enligt dom	710	0
5	2000 – 2001	RCAO-E/A2	Enligt dom	710	46
6	2000 – 2001	RCAO-E/A2	Tidigarelagd	710	0
7	2000 – 2001	RCAO-E/A2	Tidigarelagd	710	46
8	2000 – 2001	RCAO-H/A2	Enligt dom	710	0
9	2000 – 2001	RCAO-H/A2	Enligt dom	710	46
10	2000 – 2001	RCAO-H/A2	Tidigarelagd	710	0
11	2000 – 2001	RCAO-H/A2	Tidigarelagd	710	46
12	2000 – 2001	RCAO-E/A2	Enligt dom	1 010	0
13	2000 – 2001	RCAO-E/A2	Enligt dom	1 010	46
14	2000 – 2001	RCAO-H/A2	Enligt dom	1 010	0
15	2000 – 2001	RCAO-H/A2	Enligt dom	1 010	46
16	2000 – 2001	RCAO-E/A2	Enligt dom	1 370	0
17	2000 – 2001	RCAO-E/A2	Enligt dom	1 370	46
18	2000 – 2001	RCAO-H/A2	Enligt dom	1 370	0
19	2000 – 2001	RCAO-H/A2	Enligt dom	1 370	46
20	2000 – 2001	RCAO-E/A2	Enligt dom	1 500	0
21	2000 – 2001	RCAO-E/A2	Enligt dom	1 500	46
22	2000 – 2001	RCAO-H/A2	Enligt dom	1 500	0
23	2000 – 2001	RCAO-H/A2	Enligt dom	1 500	46
24	2000 – 2001	RCAO-E/A2	Enligt dom	Nivå < 470	0
25	2000 – 2001	RCAO-E/A2	Enligt dom	Nivå < 470	46
26	2000 – 2001	RCAO-H/A2	Enligt dom	Nivå < 470	0
27	2000 – 2001	RCAO-H/A2	Enligt dom	Nivå < 470	46
28	1924 – 1925	Q_{in} (obs)	Enligt dom	710	0
29	1924 – 1925	Q_{in} (obs)	Enligt dom	710	46
30	1924 – 1925	Q_{in} (obs)	Enligt dom	1 370	0
31	1924 – 1925	Q_{in} (obs)	Enligt dom	1 370	46
32	1924 – 1925	Q_{in} (obs)	Enligt dom	1 500	0
33	1924 – 1925	Q_{in} (obs)	Enligt dom	1 500	46
34	2000 – 2001	Q_{in} ökad med 0 %	Enligt dom	710	0
35	2000 – 2001	Q_{in} ökad med 10 %	Enligt dom	710	0
36	2000 – 2001	Q_{in} ökad med 20 %	Enligt dom	710	0
37	2000 – 2001	Q_{in} ökad med 30 %	Enligt dom	710	0
38	2000 – 2001	Q_{in} ökad med 40 %	Enligt dom	710	0
39	2000 – 2001	Q_{in} ökad med 50 %	Enligt dom	710	0
40	2000 – 2001	Q_{in} ökad med 0 %	Enligt dom	1 370	0
41	2000 – 2001	Q_{in} ökad med 10 %	Enligt dom	1 370	0
42	2000 – 2001	Q_{in} ökad med 20 %	Enligt dom	1 370	0
43	2000 – 2001	Q_{in} ökad med 30 %	Enligt dom	1 370	0
44	2000 – 2001	Q_{in} ökad med 40 %	Enligt dom	1 370	0
45	2000 – 2001	Q_{in} ökad med 50 %	Enligt dom	1 370	0
46	1997	Q_{in} (obs) + Europa	Enligt dom	710	0
47	1997	Q_{in} (obs) + Europa	Enligt dom	1 010	0
48	1997	Q_{in} (obs) + Europa	Enligt dom	1 370	0

Fall	Tidsperiod (årtal)	Inflöde (m^3/s)	Avtappning enligt dom eller tidigarelagd	Avbördning (m^3/s)	Havsvattennivå över uppmätt (cm)
49	1997	Q_{in} (obs) + Europa	Enligt dom	1 500	0
50	1903 – 1916	Q_{in} (obs)	Enligt dom	710	0
51	1903 – 1916	Q_{in} (obs)	Enligt dom	710	46
52	1903 – 1916	Q_{in} (obs)	Enligt dom	1 010	0
53	1903 – 1916	Q_{in} (obs)	Enligt dom	1 010	46
54	1903 – 1916	Q_{in} (obs)	Enligt dom	1 370	0
55	1932 – 1942	Q_{in} (obs)	Enligt dom	710	0
56	1932 – 1942	Q_{in} (obs)	Enligt dom	1 010	0
57	1932 – 1942	Q_{in} (obs)	Enligt dom	1 370	0
58	1995 – 1996	RCAO-E/A2	Enligt dom	710	0
59	1995 – 1996	RCAO-E/A2	Enligt dom	710	46
60	1995 – 1996	RCAO-H/A2	Enligt dom	710	0
61	1995 – 1996	RCAO-H/A2	Enligt dom	710	46

4 RESULTAT

4.1 SKILLNAD I VATTENNIVÅER

Mälarmodellen visade att skillnaden i resulterande vattennivå mellan dagens avbördning och utökad avbördning var förhållandevis markant: vattenståndet sänktes en bra bit vid utbyggd avbördning (figur 8). Däremot kunde ingen avgörande skillnad i vattenstånd mellan situationen med observerat inflöde i kombination med avbördningen 1 370 m^3/s och situationen med observerat inflöde i kombination med avbördningen 1 500 m^3/s påvisas. De allra högsta vattennivåerna endast sänktes marginellt med den högre avtappningen.

En förhållandevis stor skillnad mellan uppmätt och av modellen beräknad vattennivå i Mälaren år 2000/01 var att den uppmätta vattennivån nådde lägre nivåer, till och med under vattendomens eftersträvade lägsta nivå (figur 8). En bidragande orsak till detta var att vattendomen frångicks under perioden. Modellens exakthet studerades dock inte för någon annan tidsperiod än denna, något som gör det svårt att bedöma om skillnaden mellan beräknade och uppmätta låga vattennivåer i sjön uppträder även för andra tidsperioder. En möjlig orsak till låga vattennivåer i Mälaren kan vara att det i praktiken sker ett flöde av vatten från Mälaren när alla slussportar i modellen är stängda. Enligt moment 2 i vattendomen ska samtliga utskov i Stockholm och Hammarby- respektive Södertäljeslussen hållas stängda om vattenståndet i Saltsjön är högre eller lika högt som vattenståndet i Mälaren. Moment 5 beviljar dock att slussning sker även vid låga vattennivåer i Mälaren. Det är därför möjligt att det i praktiken finns ett utflöde från Mälaren även vid låga vattennivåer som inte har beaktats i de genomförda beräkningarna. Enligt Bertilson (2005) är detta utflöde av storleksordningen 2 500 m^3 för varje fartygsslussning. Under de perioder då vattenståndet i Mälaren nådde som lägst nivåer slussades i genomsnitt 15 fartyg per dygn genom Södertälje kanal. Detta skulle ha gett ett totalt extra utflöde på 37 500 m^3, vilket är långt ifrån tillräckligt för att kunna påverka Mälarens vattenstånd. Även Bertilson (2005) menar att den vattenmängd som försvinner vid slussning inte påverkar vattennivån i sjön. Däremot går det inte samtidigt att tappa vatten och slussa ett fartyg, varför fartygsslussning gör att avtappningstid går förlorad (Bertilson, 2005, muntligt besked). En annan bidragande faktor till låga vattennivåer i Mälaren, som inte heller beaktades i beräkningarna, kan vara att kulverten i Södertälje i verkligheten alltid står öppen (Bergström, 2004, muntligt besked). I beräkningarna i de fall som har undersökts i det här arbetet hölls den ibland stängd enligt det villkor som angavs av dess avbördningsekvation. Vid närmare betraktelse verkade dock även den vattenmängd som skulle strömma genom kulverten vara alltför liten för att kunna åstadkomma en märkbar sänkning av Mälarens vattenstånd. Ytterligare en faktor som skulle kunna bidra till de allra lägsta vattennivåerna i Mälaren är det vattenflöde som sker under Helgeandsholmen, och som inte är inkluderat i Mälarmodellen. Enligt Hällgren (2005) är detta utflöde dock för litet för att kunna påverka vattenståndet i sjön. Ett projekt för att skydda de pålar som Riksdagshuset vilar på har dessutom för avsikt att helt täta holmen, vilket kommer att resultera i att utflödet upphör (Hällgren, 2005, muntligt besked). Det är därför otroligt att de lägsta vattennivåerna skulle kunna orsakas av detta flöde.

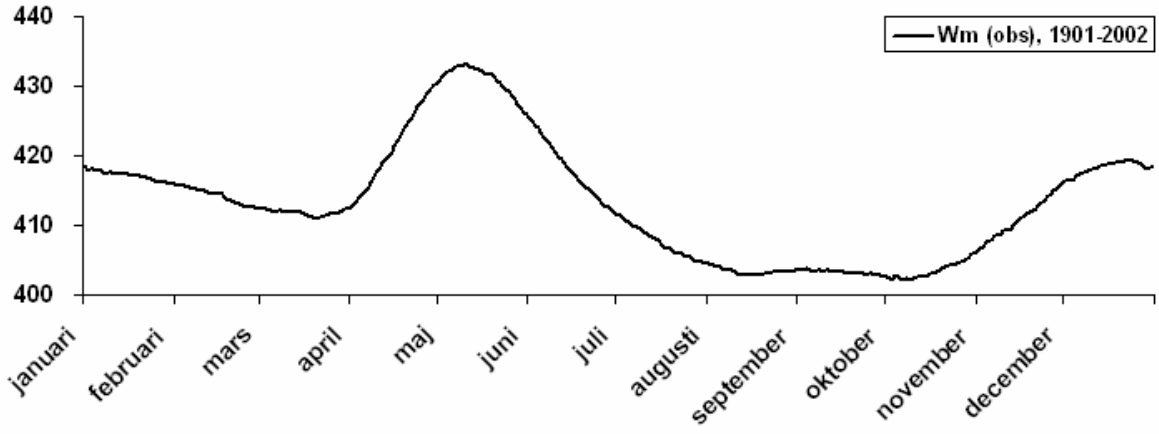
En annan orsak till att de allra lägsta vattennivåerna beräknades något högre än uppmätta nivåer kan vara att en del utskov hölls helt stängda vid låga vattennivåer i Mälaren. Vattendomen föreskriver att de olika utskoven ska hållas helt öppna när vattenståndet i Mälaren överskrider en bestämd nivå för varje utskov. Vidare ska samtliga utskov i Stockholm enligt moment 3 a i domen i normala fall hållas helt stängda vid vattenstånd under 410 cm. Detta innebär att det finns en möjlighet att hålla utskoven delvis öppna vid vattennivåer från 410 cm till de nivåer då utskoven är föreskrivna att hållas helt öppna. I beräkningarna i detta arbete har ingen hänsyn till detta tagits, då utskoven har hållits helt stängda upp till de nivåer vid vilka de är föreskrivna att hållas helt öppna.

Modellen hade ett inneboende volymfel för år 2000, vilket kan ha bidragit till att den inte återskapade verkliga förhållanden exakt under detta år. Det fanns dock en korrektionsfaktor som rättade till detta, men den ändrade inte bara volymen för år 2000 utan för hela den studerade tidsperioden. Eftersom många andra tidsperioder än år 2000 undersöktes i det här arbetet användes inte korrektionsfaktorn i något av fallen. Trots att modellen alltså inte fungerade riktigt för år 2000 var det ändå viktigt att studera denna tidsperiod. Under perioden uppvisade nämligen båda RCAO-scenarierna höga inflöden till Mälaren samtidigt som sjöns uppmätta vattennivå översteg vattendomens högsta föreskrivna nivå. Ytterligare en osäkerhet i beräkningarna är att de ekvationer som styr öppning och stängning av utskoven inte är exakta utan endast utgör approximativa samband.

4.2 ANALYSER AV HISTORISKA DATA

4.2.1 Årliga variationer i vattennivå under 1900-talet

Det gick tydligt att se att Mälarens vattennivå varierade enligt ett bestämt mönster då medelvärdena för varje dygn under perioden 1901 – 2002 studerades (figur 12). Vattennivån uppvisade en stor topp under månaderna april, maj och juni. En mindre topp upptäcktes under vintern, nämligen i december och januari. Augusti, september och oktober uppvisade årets lägsta vattennivåer.



Figur 12. Dygnsmedelvärden för uppmätt vattennivå i Mälaren åren 1901 - 2002. Vattennivån är angiven i centimeter i Mälarens höjdsystem.

Den statistiska beräkningen avseende medelvärden för varje årstid (tabell 5) stämde förhållandevis väl överens med beskrivningen av dygnsmedelvärdena.

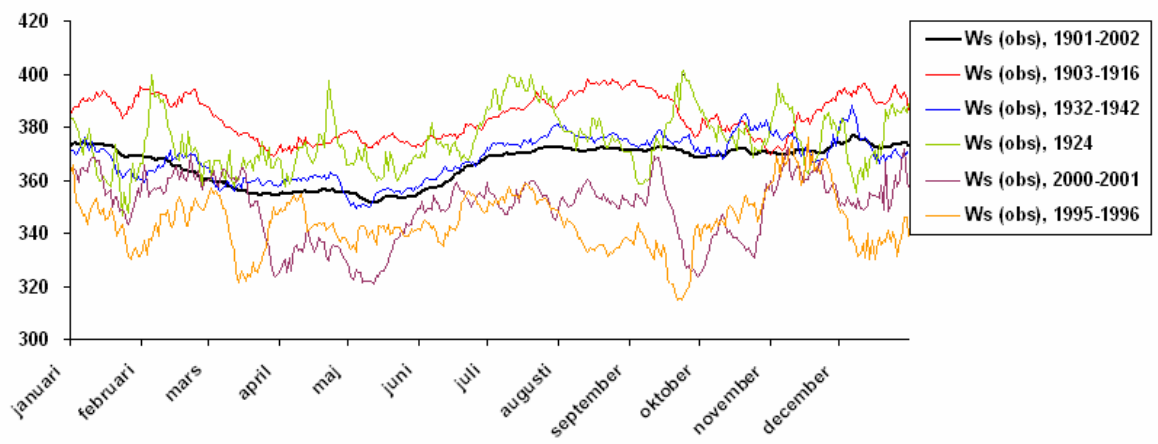
Tabell 5. Årstidsmedelvärden för uppmätt vattennivå i Mälaren under perioden 1901 - 2002.

Årstid	Vattenstånd (cm)
Vinter	417
Vår	421
Sommar	410
Höst	406

Nollhypotesen att alla medelvärden är statistiskt lika kunde förkastas på signifikansnivån 0,05. En rangordning av nivåerna gav resultatet att vårens nivå var högst, följt av vinterns. Skillnaden mellan sommarens och höstens nivåer var inte statistiskt signifikant.

Alla år följde dock inte detta mönster. Exempel på år som uppvisade en annan variation var år 1912/13, 1916, 1936 och år 2000/01. År 1912/13 hade en hög vattennivå under vintermånaderna – från november 1912 till och med mars 1913 – men saknade i stort sett den förväntade toppen på våren. År 1912 saknades den helt, medan den under år 1913 gick att se nästan som en fortsättning på vintertoppen. År 2000/01 uppvisade ett liknande mönster som år 1912/13. Höga vattennivåer uppmättes under vintern, medan våren visade en total frånvaro av sådana. År 1916 gick ett helt annat mönster att skönja. En period med högt vattenstånd inträffade då under månaderna april – augusti. De höga nivåer som vanligtvis infaller under vintern gick istället att se under månaderna februari och mars. Ytterligare en variation i vattennivå över året gick att påvisa 1936. Då var vattennivåerna nästan lika höga i januari som i maj, med något lägre nivåer i mars och april. Under det senare halvåret av 1936 höll sig vattenståndet så när som på ett par dagar hela tiden under de nivåer som rådde under det första halvåret.

Hur vattennivån i Östersjön varierar med årstiderna var mycket svårare att undersöka eftersom variationerna var så stora. Medelvärden av Östersjöns vattenstånd för varje dygn under åren 1901 – 2002 gav dock en del viktig information (figur 13). Precis som förväntat gick de att – i alla fall visuellt – påvisa att havsvattennivån var lägre under mars – juni än under årets övriga månader, då den antog ungefär samma nivå. En liten ökning under december och januari kunde visserligen anas. Det faktum att vattenstånden blir allt lägre med tiden beror på landhöjningen.



Figur 13. Dygnsmedelvärden av det uppmätta vattenståndet i Östersjön. Vattennivån är angiven i centimeter i Mälarens höjdsystem.

Medelvärdena för havsvattennivån förutsatt samma årstidsindelning som för Mälaren (tabell 6) gav en del information, men dock inte så mycket.

Tabell 6. Årstidsmedelvärden för uppmätt havsvattennivå under perioden 1901 - 2002.

Årstid	Vattenstånd (cm)
Vinter	371
Vår	355
Sommar	367
Höst	371

Visserligen kunde nollhypotesen att alla medelvärden skulle vara lika stora förkastas på signifikansnivån 0,05, och det gick även att avgöra att vårens vattenstånd var statistiskt signifikant lägre än de övriga. Förutom detta gick det inte att utläsa några andra resultat ur beräkningen, då skillnaderna mellan de övriga årstidernas medelvattennivåer inte var statistiskt signifikanta.

Lite tydligare resultat erhölls med den andra årstidsindelningen (tabell 7), där hänsyn togs till de stora variationer som havsvattennivån undergår.

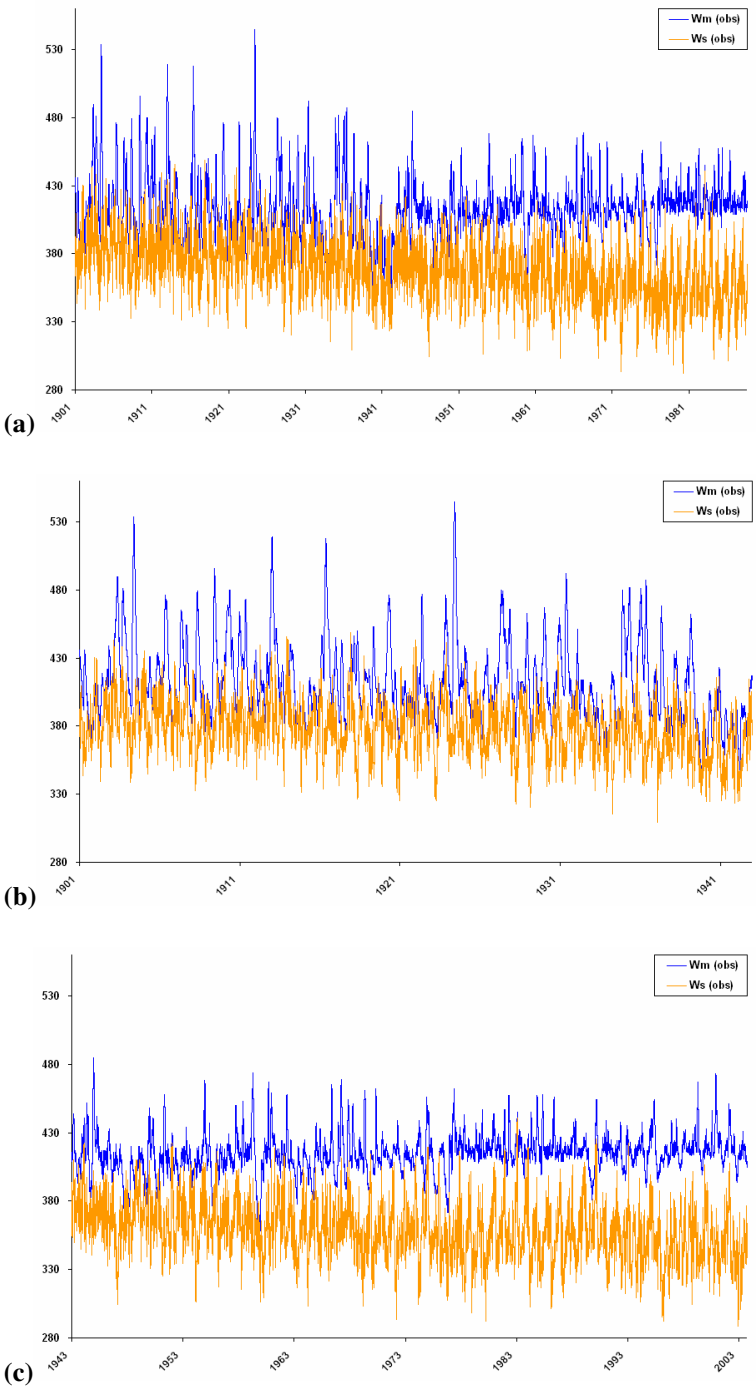
Tabell 7. Medelvärden för uppmätt havsvattennivå under perioden 1901 - 2002. I årstidsindelningen togs hänsyn till havsvattennivåns stora variationer.

Årstid	Vattenstånd (cm)
Vinter	373
Vår/försommar	357
Höst	371

Skillnaderna i medelvattenstånd mellan alla tre perioder var statistiskt signifikanta på signifikansnivån 0,05. Vattenståndet var enligt denna indelning även lägst på våren. Den högsta nivån erhölls under vintern följt av hösten.

4.2.2 Samband mellan havsvattennivån och Mälarens vattenstånd

Det var svårt att avgöra om vattennivån i Mälaren har berott av havsvattennivån endast genom att titta på diagram, speciellt med tanke på att landhöjningen gör att havsvattennivån sjunker (figur 14).



Figur 14. Uppmätt vattennivå i Mälaren, W_m (obs), respektive Östersjön, W_s (obs), (a) år 1901 - 2003, (b) år 1901 - 1942 och (c) år 1943 - 2003. Vattennivån är angiven i centimeter i Mälarens höjdsystem.

Pearsons korrelationskoefficient gav däremot en del resultat. De tre undersökta tidsperioderna uppvisade olika korrelationskoefficienter, det vill säga olika samband mellan havsvattennivån och vattenståndet i Mälaren (tabell 8).

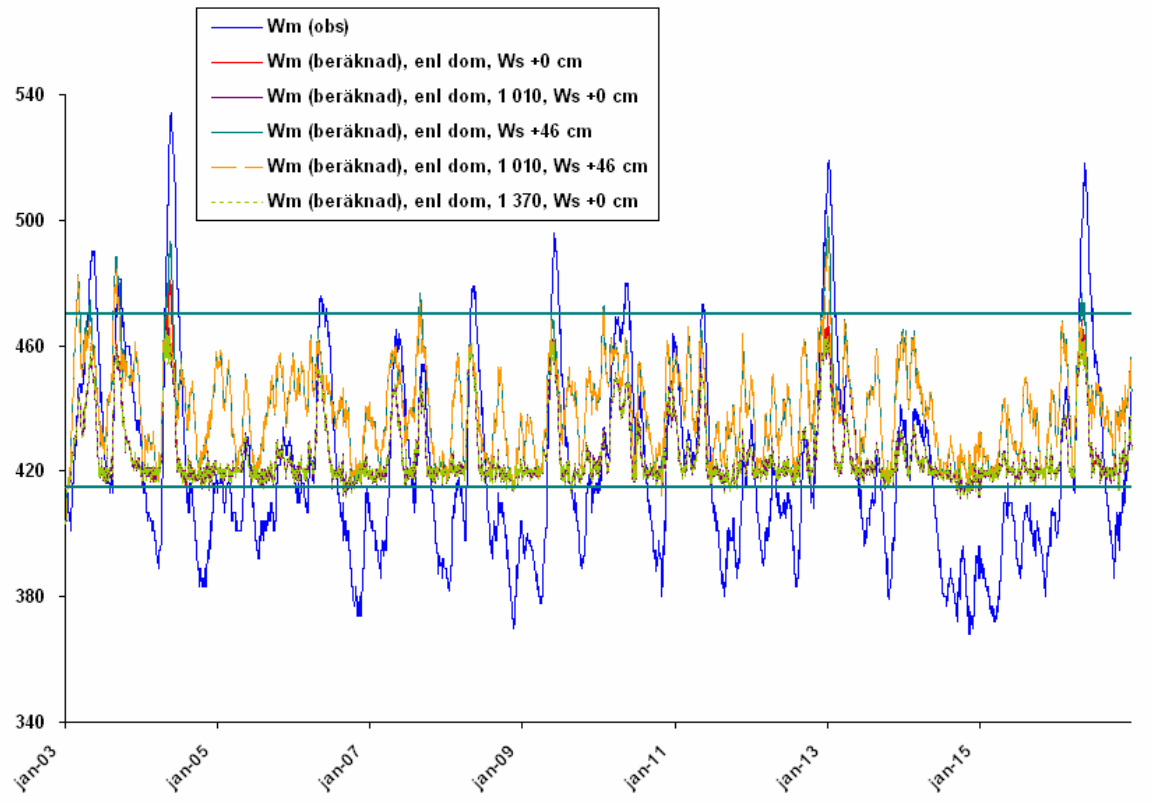
Tabell 8. Beräknade korrelationskoefficienter mellan havsvattennivån och vattenståndet i Mälaren för olika tidsperioder.

Studerad tidsperiod	Pearsons korrelations-koefficient, r
1901-2003	0,106
1901-1942	0,225
1943-2003	0,069

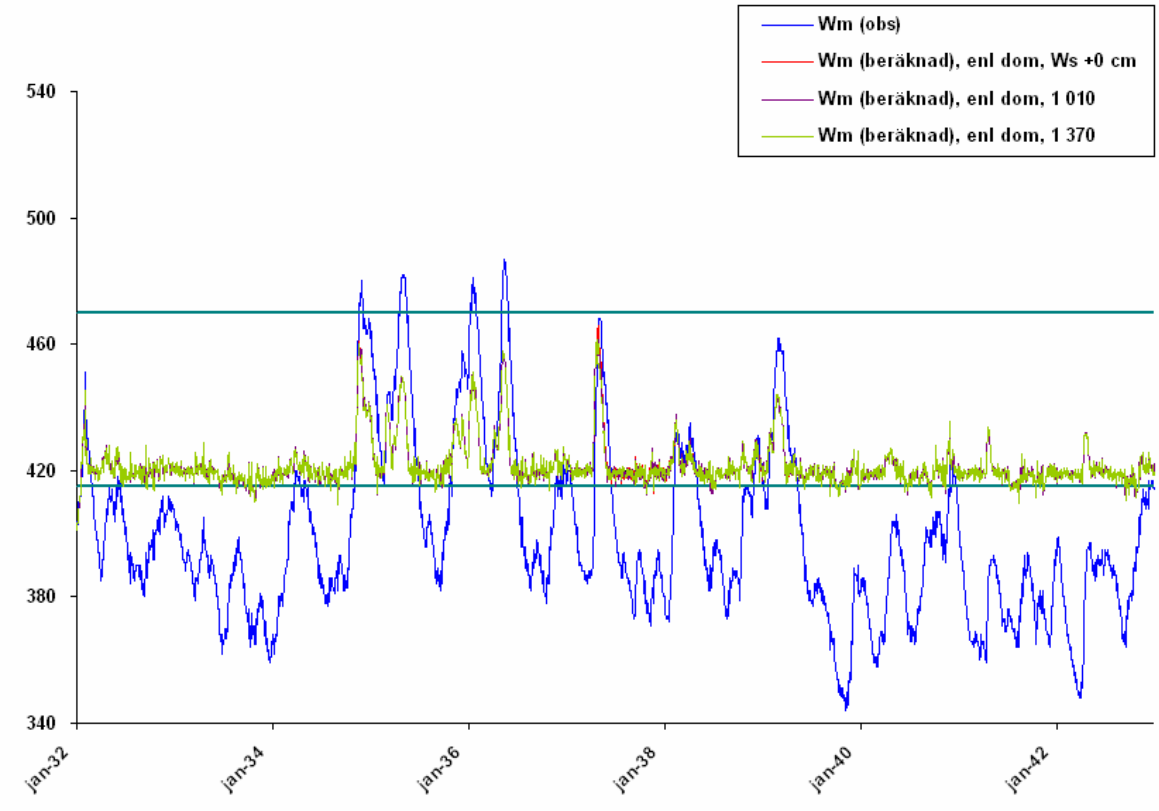
Nollhypotesen, $r = 0$, innebär att inget samband mellan de två mätserierna finns. Om korrelationskoefficienten var större än 0,195 kunde nollhypotesen förkastas på signifikansnivån 0,05. Alltså gick det att förkasta nollhypotesen i ett av fallen. För de år som Mälaren har varit oreglerad rådde ett positivt samband mellan vattenståndet i Östersjön och vattennivån i Mälaren. Om åren med reglerat flöde eller om hela 1900-talet betraktas gick det dock inte att hitta något samband mellan mätserierna.

4.2.3 Vattendomens påverkan på Mälarens vattenstånd

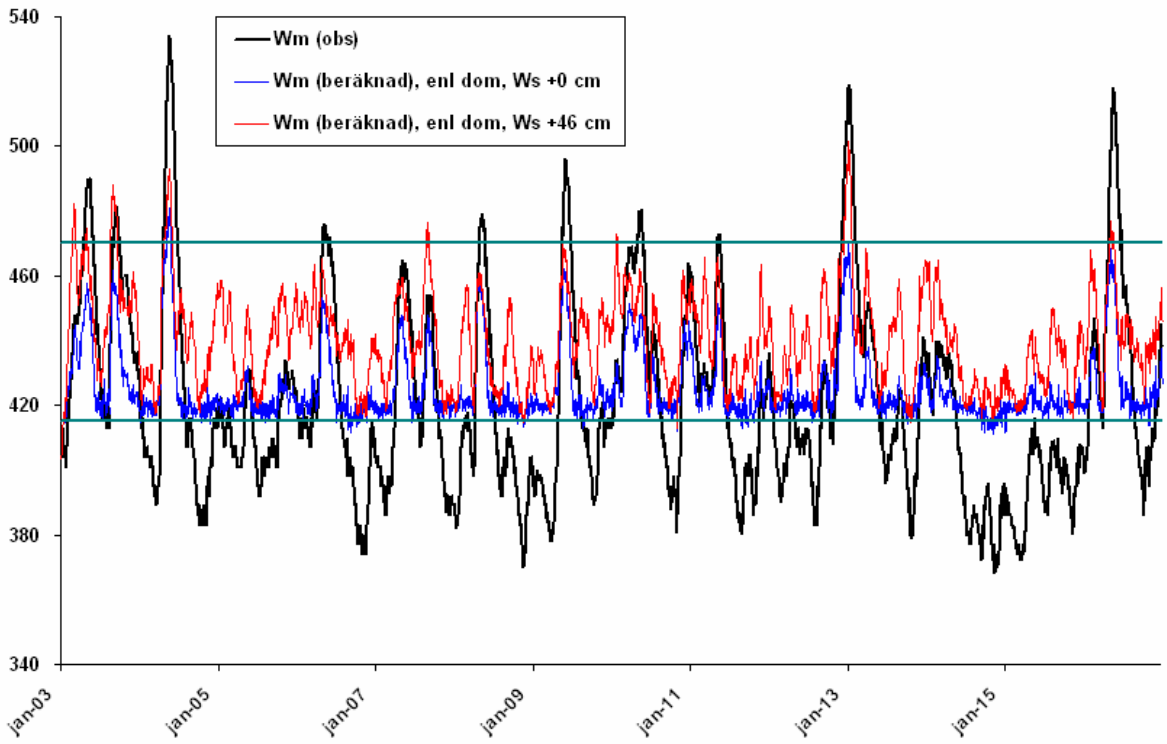
Både för år 1903 – 1916 med höga vattennivåer (fall 50 – 54 i tabell 4) och för år 1932 – 1942 med låga vattennivåer (fall 55 – 57 i tabell 4) hittades vissa gemensamma svar. Då vattenflödet reglerades med dagens regleringskapacitet sänktes de höga vattennivåerna något. Ytterligare en liten sänkning av de allra högsta nivåerna kunde observeras vid utbyggd avbördningskapacitet, men skillnaden i resulterande vattennivå mellan situationerna med de olika avbördningarna var inte särskilt framträdande. Av större intresse var istället att alla låga vattennivåer höjdes avsevärt och hölls på en stabil nivå (figur 15a-b). Detta tydliggjordes speciellt av åren 1932 – 1942. Värt att notera var också att båda perioderna, men i synnerhet 1903 – 1916, uppvisade flera tillfällen då vattennivån steg över vattendomens högsta föreskrivna nivå. Ytterligare ett intressant resultat var att kombinationen av åren 1903 – 1916, avtappningsalternativen 710 m^3/s respektive 1 010 m^3/s och en förhöjd havsvattennivå gav förhållandevis mycket högre vattenstånd i Mälaren jämfört med likadana kombinationer utan förhöjd havsvattennivå (figur 15c-d).


Wm (obs)
Wm (beräknad), enl dom, Ws +0 cm
Wm (beräknad), enl dom, 1 010, Ws +0 cm
Wm (beräknad), enl dom, Ws +46 cm
Wm (beräknad), enl dom, 1 010, Ws +46 cm
Wm (beräknad), enl dom, 1 370, Ws +0 cm
540
500
460
420
380
340
jan-03
jan-05
jan-07
jan-09
jan-11
jan-13
jan-15

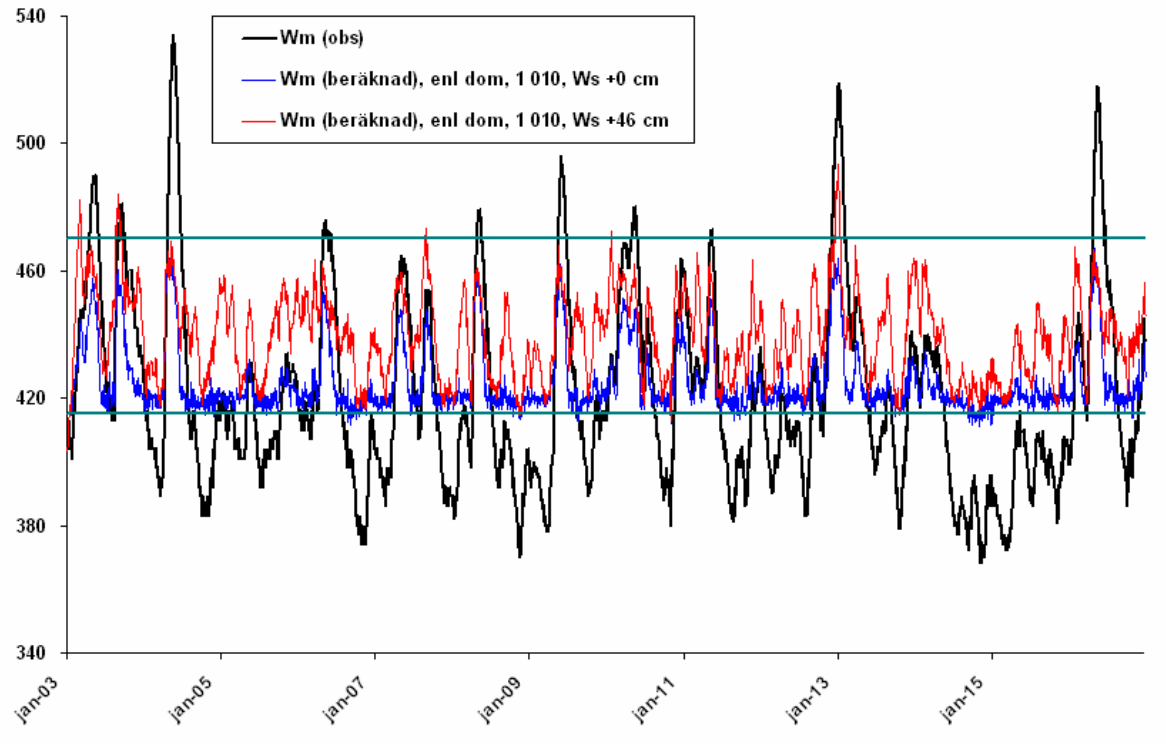
(a)


Wm (obs)
Wm (beräknad), enl dom, Ws +0 cm
Wm (beräknad), enl dom, 1 010
Wm (beräknad), enl dom, 1 370
540
500
460
420
380
340
jan-32
jan-34
jan-36
jan-38
jan-40
jan-42

(b)



(c)

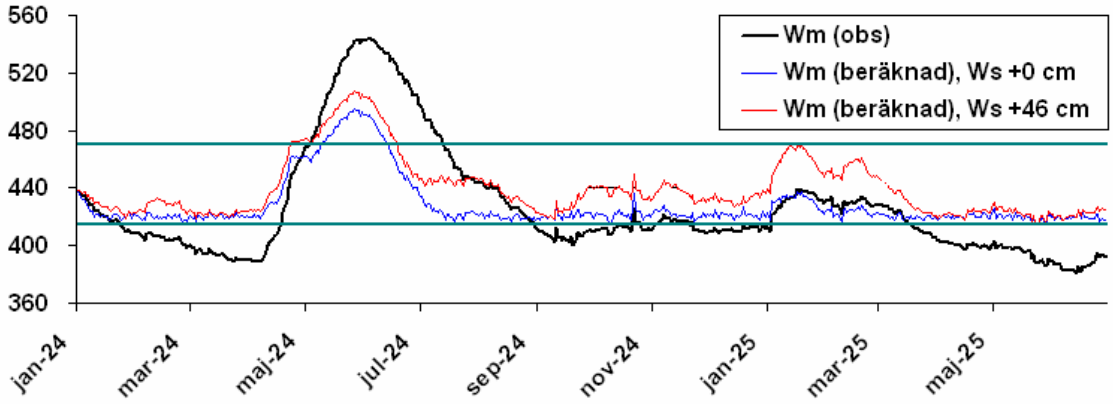


(d)

Figur 15. Beräknad vattennivå i Mälaren då det naturliga inflödet reglerades enligt dagens regleringsbestämmelser och med utökad avbördningskapacitet (a) år 1903 – 1916, (b) år 1932 – 1942 samt slutligen (c-d) även i kombination med en förhöjd havsvattennivå (W_s +46 cm) år 1903 – 1916. Vattennivån är angiven i centimeter i Mälarens höjdsystem.

4.2.4 1900-talets högst noterade vattenstånd

Under perioden 1 januari 1924 – 30 juni 1925 hade regleringen av Mälaren inte kommit igång. Regleringen av vattnet skulle ha fått en förhållandevis stor påverkan på vattenståndet (tabell 9 och figur 16).



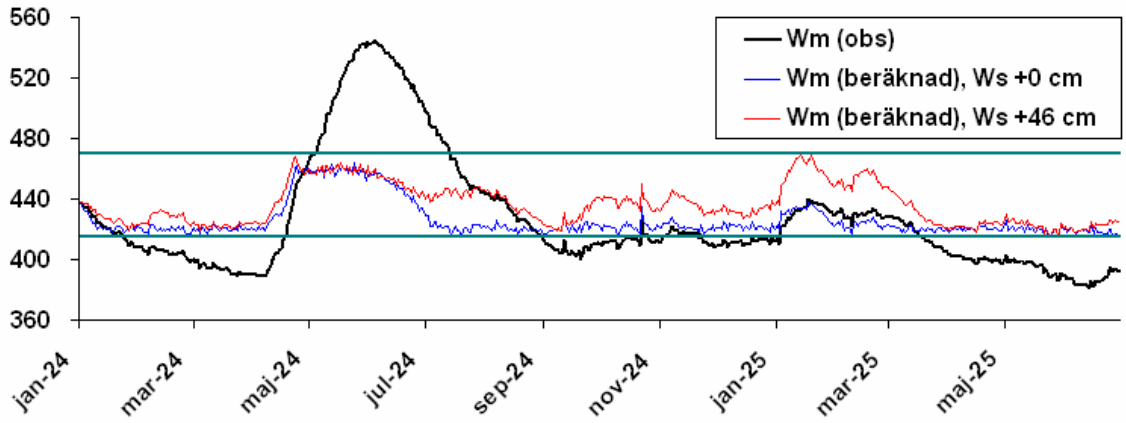
Figur 16. Beräknat vattenstånd i Mälaren med observerat inflöde som indata i Mälarmodellen. Regleringen av vattnet skedde enligt dagens avbördningsförmåga. Både uppmätt (W_s +0 cm) och förhöjd (W_s +46 cm) havsvattennivå undersöktes. Vattennivån är angiven i centimeter i Mälarens höjdsystem.

Vattennivåerna var dock så höga att reglering med dagens kapacitet inte hade kunnat sänka dem under 470 cm, speciellt inte om havsvattennivån hade varit högre än den uppmätta (fall 28 – 29 i tabell 4). Den allra högsta nivån i sjön i fallet med uppmätt havsvattennivå hade nått knappt under fem meter, och i fallet med förhöjd havsvattennivå över fem meter. En förhöjd havsvattennivå observerades samtidigt med förhöjt vattenstånd i Mälaren under en stor del av den undersökta tidsperioden, även om inget mekaniskt samband föreligger. Vattnet steg till och med så mycket under vintern 1925 att det överskred 470 cm. Under förutsättning att havsvattennivån inte steg över uppmätta värden bidrog regleringen både till att sänka vattennivåerna i Mälaren och till att korta av perioderna med höga nivåer. Åren 1924/25 var inte enbart år med höga vattenstånd utan även med låga. Det visade sig att de låga vattennivåerna höjdes avsevärt om reglering infördes, precis som för åren 1903 – 1916 och 1932 – 1942.

Tabell 9. Beräknad högsta respektive lägsta vattennivå i Mälaren vid observerat inflöde i kombination med dagens avbördningsförmåga samt uppmätt respektive förhöjd havsvattennivå för perioden 1924 – 1925. Tabellen visar även den uppmätta vattennivån i Mälaren under samma tidsperiod.

Inflöde (m^3/s)	Avtappning enligt dom eller tidigarelagd	Avbördning (m^3/s)	Havsvattennivå över uppmätt (cm)	Högsta nivå (cm)	Lägsta nivå (cm)
Q_{in} (obs)	Enligt dom	710	0	495	414
Q_{in} (obs)	Enligt dom	710	46	507	416
			Uppmätt vattennivå	545	382

Två fall av utökad avtappning (tabell 10) undersöktes för åren 1924/25 (fall 30 – 33 i tabell 4). Eftersom avbördningen 1 370 m^3/s var tillräcklig för att hålla Mälarens vattenstånd under vattendomens högsta nivå då inflödet kom från RCAO-E/A2 för år 2000/01, undersöktes vad vattenståndet år 1924/25 skulle ha blivit med denna avbördning. Det visade sig att vattenståndet alla de dagar det översteg 470 cm sjönk under denna nivå (tabell 10 och figur 17). I övrigt observerades precis som i fallet med avbördningen 710 m^3/s en förhöjd havsvattennivå samtidigt som ett högt vattenstånd i Mälaren, och regleringens förmåga att höja låga vattenstånd.



Figur 17. Beräknade vattennivåer i Mälaren med observerat inflöde som indata till Mälarmodellen i kombination med en utökad avbördning till 1 370 m^3/s. Både uppmätt (W_s +0 cm) och förhöjd (W_s +46 cm) havsvattennivå undersöktes. Vattennivån är angiven i centimeter i Mälarens höjdsystem.

En utökad avbördning till 1 500 m^3/s påverkade inte Mälarens vattennivå på ett synbart annorlunda sätt än avtappningen 1 370 m^3/s (tabell 10).

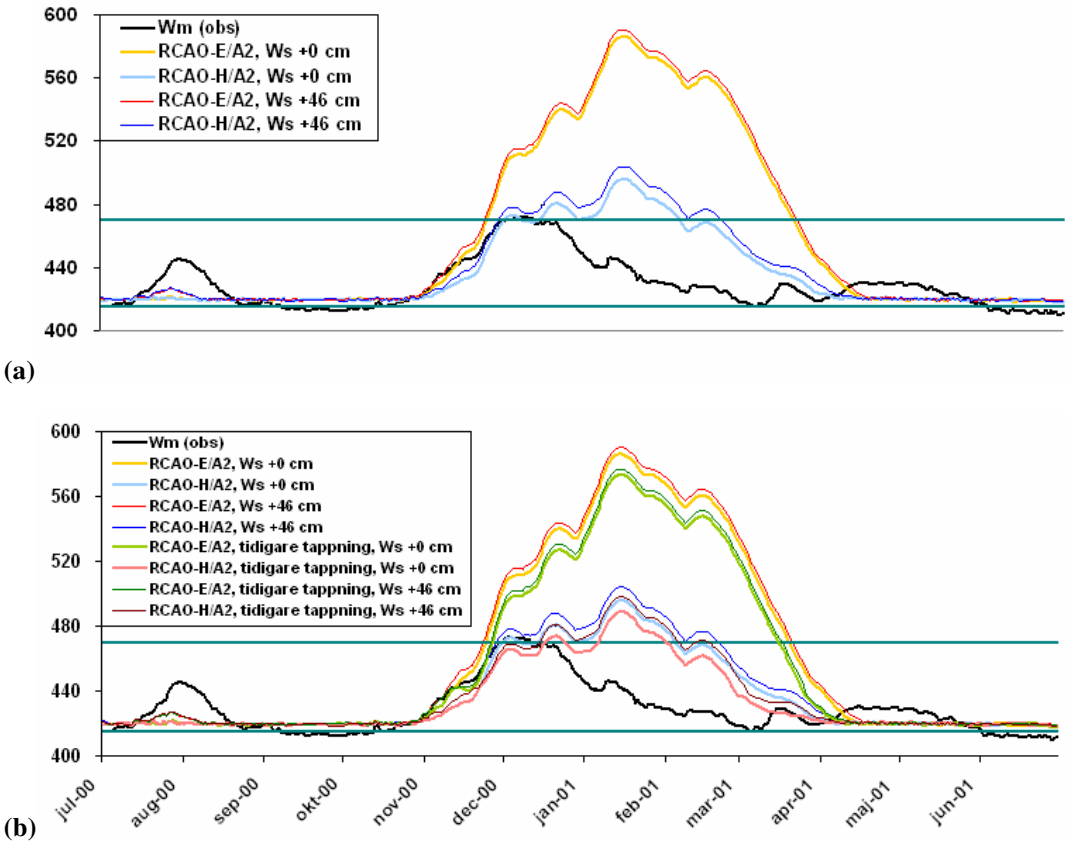
Tabell 10. Beräknat högsta respektive lägsta vattenstånd i Mälaren vid observerat inflöde i kombination dels med utökad avbördningsförmåga, dels med förhöjd havsvattennivå under perioden 1924 – 1925.

Inflöde (m^3/s)	Avtappning enligt dom eller tidigarelagd	Avbördning (m^3/s)	Havsvattennivå över uppmätt (cm)	Högsta nivå (cm)	Lägsta nivå (cm)
Q_{in} (obs)	Enligt dom	1 370	0	464	415
Q_{in} (obs)	Enligt dom	1 370	46	469	416
Q_{in} (obs)	Enligt dom	1 500	0	463	415
Q_{in} (obs)	Enligt dom	1 500	46	469	416

4.3 MÄLARENS VATTENSTÅND VID OLIKA INFLÖDESSCENARIER OCH AVBÖRDNINGAR

4.3.1 Dagens avbördningsförmåga

Vilken Mälarens möjliga vattennivå skulle bli om ingen utbyggnad av dess utlopp sker undersöktes i kombination med ett flertal olika inflödesscenarier. För det första användes under perioden 1 juli 2000 – 30 juni 2001 inflöde från RCAO-E/A2 respektive RCAO-H/A2 (tabell 11). Dessutom undersöktes samvariationen mellan Mälarens vattenstånd och en förhöjning av havsvattennivån med 46 cm, och vilken effekten på sjöns vattenstånd blev om tappningen tidigarelades (fall 4 – 11 i tabell 4). Med dagens avtappningsförmåga visade det sig att Mälarens nivå för båda indataserierna steg enormt mycket över riktvärdet 470 cm (figur 18a). Allra högst vattennivå erhölls med indata från RCAO-E/A2. En annan stor skillnad jämfört med de uppmätta värdena var att perioden med högt vattenstånd varade mycket längre, ungefär dubbelt så länge. Ytterligare en skillnad mellan beräknad och uppmätt vattennivå var att den uppmätta nivån nådde mycket lägre nivåer, till och med under vattendomens rekommenderade lägsta nivå. Vidare visade det sig att endast ett lite högre vattenstånd i Mälaren observerades samtidigt som en förhöjd havsvattennivå. Vattenståndet var något högre om indata från RCAO-H/A2 användes än om indata istället kom från RCAO-E/A2.



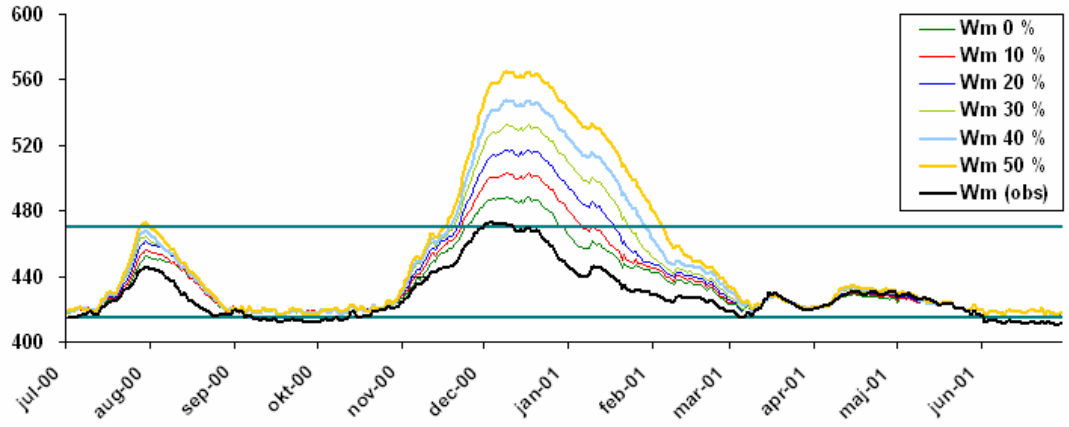
Figur 18. Beräknade vattennivåer i Mälaren med indata från RCAO-E/A2 respektive RCAO-H/A2 i kombination med dagens avbördningsförmåga men även i kombination med uppmätt (W_s +0 cm) respektive förhöjd (W_s +46 cm) havsvattennivå. Avtappningen följer (a) vattendomen eller är (b) tidigarelagd. Vattennivån är angiven i centimeter i Mälarens höjdsystem.

Att behålla dagens avtappningsmängd men att tidigarelägga full tappning gav inte en betydande sänkning av vattennivån (figur 18b). I de fall då indata kom från RCAO-E/A2 resulterade den tidigarelagda avtappningen i en ungefärlig sänkning av vattenståndet med 15 cm. Inflöde från RCAO-H/A2 gav en ännu mindre sänkning av vattennivån, endast cirka 10 cm. En sänkning av de högsta vattenstånden med ungefär en decimeter vid tidigarelagd tappning är även vad SMHI (2003) kommer fram till. SMHI (2003) använder dock observerat inflöde som indata men beräkningarna är även de genomförda med Mälarmodellen.

Tabell 11. Beräknad högsta respektive lägsta vattennivå i Mälaren under perioden 2000 – 2001 vid inflödesscenarier från RCAO-E/A2 respektive RCAO-H/A2 i kombination med dagens avbördningsförmåga och i vissa fall även i kombination med en tidigarelagd avtappning. Både uppmätt och förhöjd havsvattennivå undersöktes.

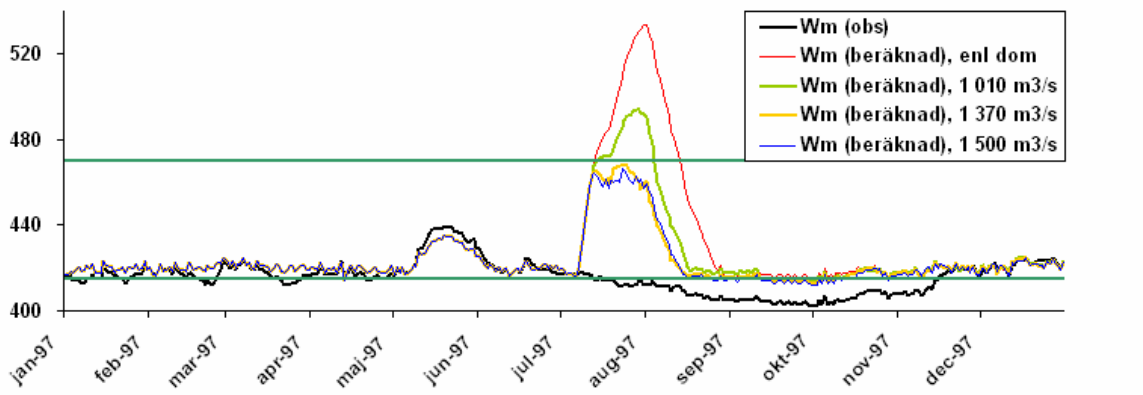
Inflöde (m^3/s)	Avtappning enligt dom eller tidigarelagd	Avbördning (m^3/s)	Havsvattennivå över uppmätt (cm)	Högsta nivå (cm)	Lägsta nivå (cm)
RCAO-E/A2	Enligt dom	710	0	586	418
RCAO-E/A2	Enligt dom	710	46	590	419
RCAO-E/A2	Tidigarelagd	710	0	574	417
RCAO-E/A2	Tidigarelagd	710	46	577	419
RCAO-H/A2	Enligt dom	710	0	495	418
RCAO-H/A2	Enligt dom	710	46	504	418
RCAO-H/A2	Tidigarelagd	710	0	489	418
RCAO-H/A2	Tidigarelagd	710	46	498	418

När det gällde Mälarens vattenstånd vid ett påslag på nederbörden under perioden 1 juli 2000 – 30 juni 2001 steg det rejält till följd av påslaget om avbördningen skedde med dagens kapacitet (fall 34 – 39 i tabell 4). Förutom att vattennivån blev högre under tider med redan höga nivåer, förblev den även förhållandevis hög under längre tidsperioder (figur 19). Vidare höjdes vattennivån linjärt med ökningen i nederbörd – ett påslag på 20 % gav en dubbelt så stor höjning av vattennivån som ett påslag på 10 %.



Figur 19. Beräknade vattennivåer i Mälaren (W_m) med indata till Mälarmodellen i form av en procentuell ökning av det observerade inflödet i kombination med dagens avbördningsförmåga. Vattennivån är angiven i centimeter i Mälarens höjdsystem.

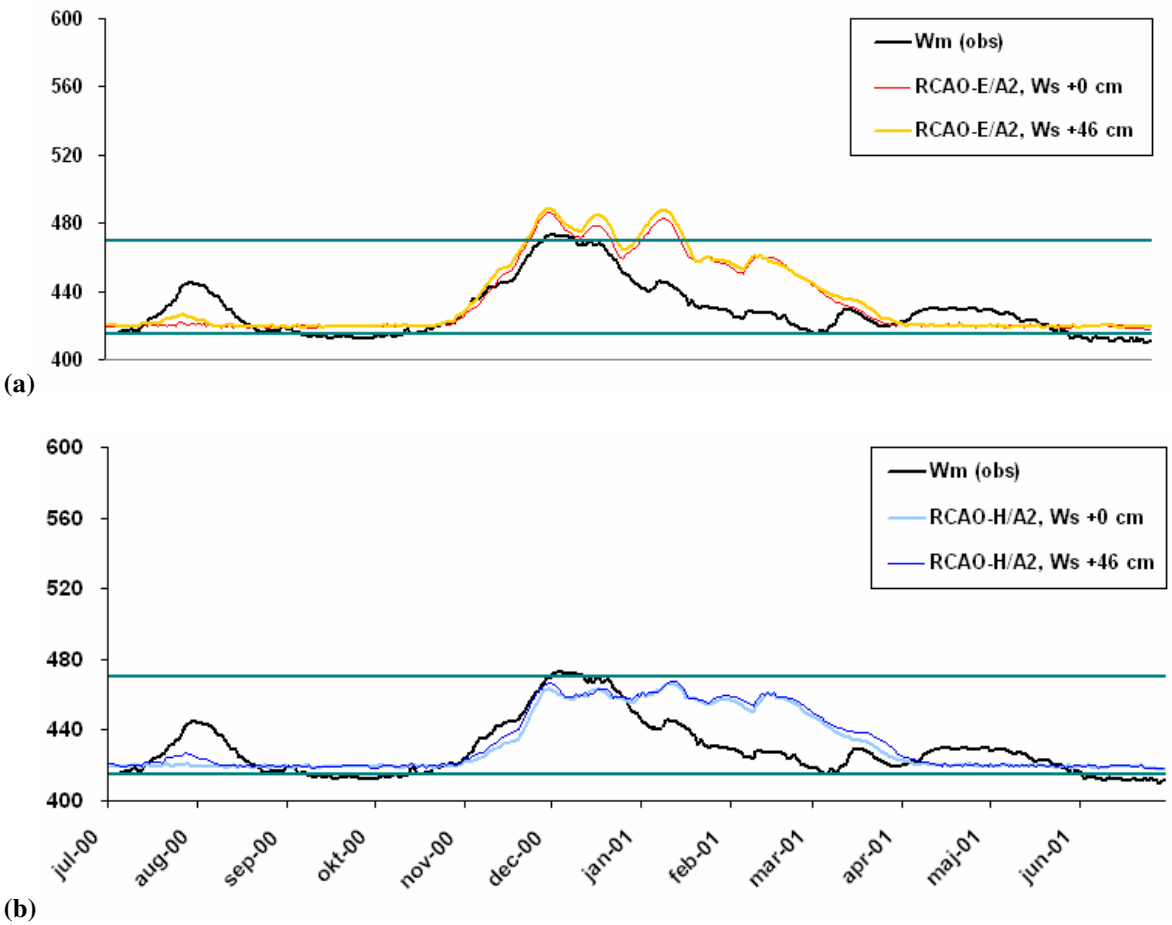
Den nederbörd som föll över Centraleuropa i juli 1997 skulle ha resulterat i väldigt höga vattennivåer i Mälaren om motsvarande nederbördsmängd hade fallit över sjöns avrinningsområde (figur 20). Om ingen utbyggnad av dagens avbördningskapacitet förutsattes (fall 46 i tabell 4) kom vattnet i Mälaren med detta inflöde att stiga långt över 470 cm och den 1 augusti nå hela 534 cm. Detta var endast drygt en decimeter under 1900-talets högst noterade vattenstånd på 545 cm. Vattennivån 534 cm motsvarade ett ungefärligt påslag på nederbörden med 30 %.



Figur 20. Beräknade vattennivåer i Mälaren då inflödet under juli 1997 motsvarades av den nederbörd som föll över Centraleuropa samma månad. Nivåerna visas för olika avbördningsalternativ. Vattennivån är angiven i centimeter i Mälarens höjdsystem.

4.3.2 Avbördningsförmåga utökad till 1 010 m^3/s

Mälarens vattenstånd vid avtappningsalternativet 1 010 m^3/s (tabell 12) undersöktes i kombination med tre olika inflödesscenarier: inflöde från RCAO-E/A2 respektive RCAO-H/A2 under perioden 1 juli 2000 – 30 juni 2001 (fall 12 – 15 i tabell 4), samt observerat inflöde under årets alla månader år 1997 förutom under juli månad då inflödet istället motsvarade nederbörden över Centraleuropa (fall 47 i tabell 4). Perioden 1 juli 2000 – 30 juni 2001 kombinerades även med en förhöjd havsvattennivå. För denna period gick det att notera en ytterst avgörande skillnad i resultaten när det gällde att hålla vattennivån i Mälaren under 470 cm. Det visade sig nämligen att denna avbördningsmängd var tillräcklig för att i fallet med inflöde från RCAO-H/A2 sänka vattenståndet under 470 cm (figur 21a). Den högsta nivå som noterades var 468 cm. För att klara samma mål med indata från RCAO-E/A2 krävdes dock en större avbördningskapacitet eftersom vattendomens övre gräns överskreds med 19 cm (figur 21b). Två likheter mellan resultaten från de olika indataserierna och med fallen avseende dagens tappningsförmåga fanns dock. För det första observerades endast en aning högre vattenstånd i Mälaren samtidigt med en förhöjd havsvattennivå. För det andra höll perioden med höga vattennivåer i sig längre än den gjorde enligt uppmätta värden.



Figur 21. Beräknade vattennivåer i Mälaren med inflödesscenarier från (a) RCAO-E/A2 respektive (b) RCAO-H/A2 i kombination med avbördningen 1 010 m^3/s och i kombination med uppmätt (W_s +0 cm) respektive förhöjd (W_s +46 cm) havsvattennivå. Vattennivån är angiven i centimeter i Mälarens höjdsystem.

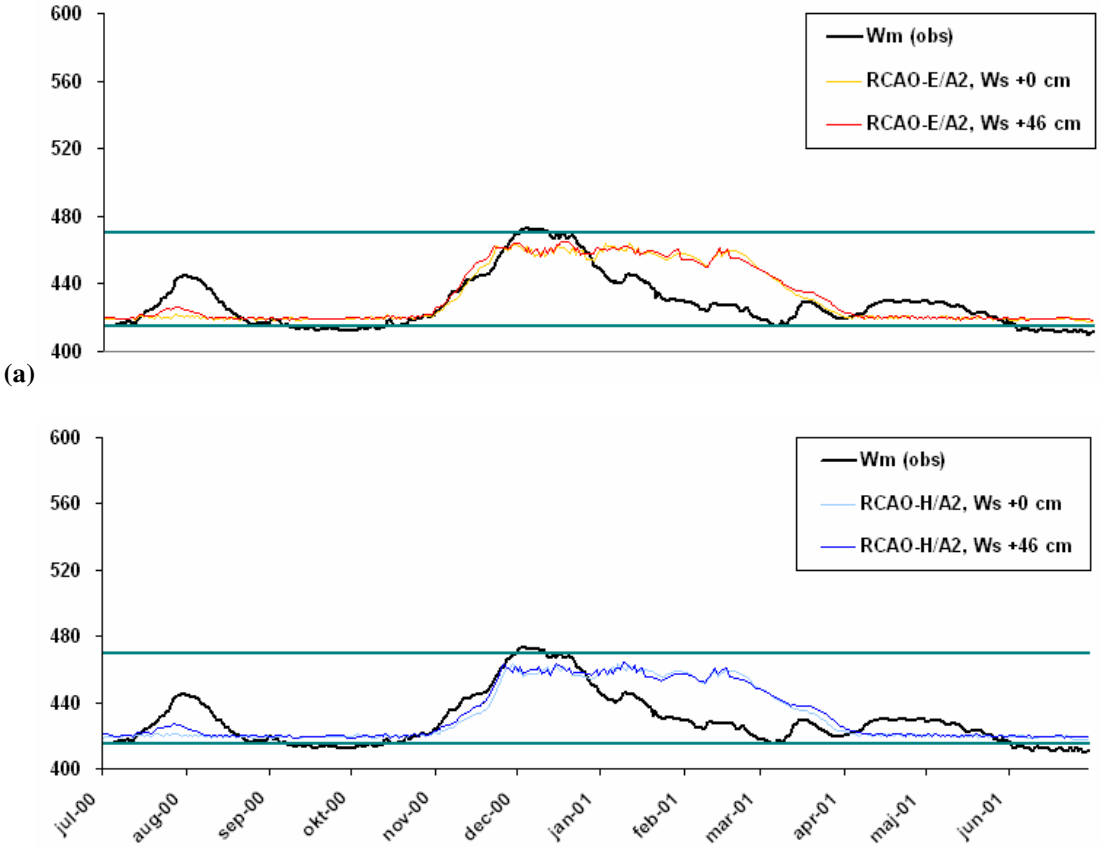
Tabell 12. Beräknad högsta respektive lägsta vattennivå i Mälaren under perioden 2000 – 2001 vid inflödesscenarier från RCAO-E/A2 respektive RCAO-H/A2 i kombination med avbördningen 1 010 m^3/s. Både uppmätt och förhöjd havsvattennivå undersöktes.

Inflöde (m^3/s)	Avtappning enligt dom eller tidigarelagd	Avbördning (m^3/s)	Havsvattennivå över uppmätt (cm)	Högsta nivå (cm)	Lägsta nivå (cm)
RCAO-E/A2	Enligt dom	1 010	0	486	418
RCAO-E/A2	Enligt dom	1 010	46	489	419
RCAO-H/A2	Enligt dom	1 010	0	466	418
RCAO-H/A2	Enligt dom	1 010	46	468	418

När det gällde inflödet motsvarande nederbörden över Centraleuropa överskred vattennivån även med denna utbyggnad 470 cm (figur 20).

4.3.3 Avbördningsförmåga utökad till 1 370 m^3/s

Avtappningskapaciteten 1 370 m^3/s kombinerades för det första med inflöde både från RCAO-E/A2 och från RCAO-H/2, och med uppmätt respektive förhöjd havsvattennivå (fall 16 – 19 i tabell 4). För det andra användes det observerade inflödet med ett procentuellt påslag (fall 40 – 45 i tabell 4) och för det tredje undersöktes vattenståndet i Mälaren vid inflöde motsvarande nederbörden över Centraleuropa i juli 1997 (fall 48 i tabell 4). I fallet med inflöde från RCAO-H/A2 syntes endast en liten sänkning av vattenståndet jämfört med avtappningsmängden 1 010 m^3/s (figur 22b). Däremot inträffade en markant skillnad då inflödet istället kom från RCAO-E/A2 (figur 22a). Vattennivån hölls då hela tiden under 470 cm (tabell 13), det vill säga under vattendomens högsta föreskrivna nivå. På samma sätt som i fallet med avbördningsmängden 1 010 m^3/s observerades bara en något högre vattennivå i Mälaren samtidigt som ett förhöjt vattenstånd i Östersjön och perioden med höga vattennivåer höll i sig förhållandevis länge.

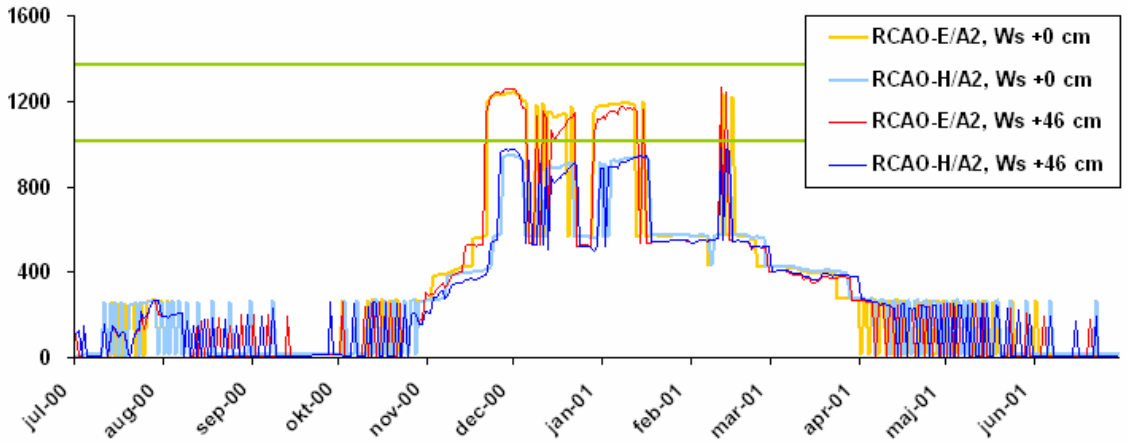


Figur 22. Beräknade vattennivåer i Mälaren med inflödesscenarier från (a) RCAO-E/A2 respektive (b) RCAO-H/A2 i kombination med avbördningen 1 370 m^3/s och i kombination med uppmätt (W_s +0 cm) respektive förhöjd (W_s +46 cm) havsvattennivå. Vattennivån är angiven i centimeter i Mälarens höjdsystem.

Tabell 13. Beräknad högsta respektive lägsta vattennivå i Mälaren under perioden 2000 – 2001 vid inflödesscenarier från RCAO-E/A2 respektive RCAO-H/A2 i kombination med avbördningen 1 370 m^3/s. Både uppmätt och förhöjd havsvattennivå undersöktes.

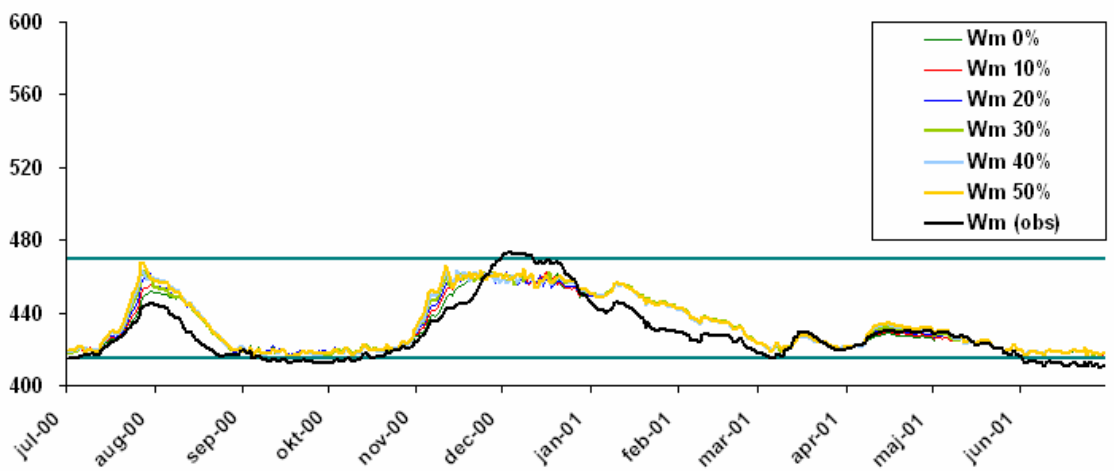
Inflöde (m^3/s)	Avtappning enligt dom eller tidigarelagd	Avbördning (m^3/s)	Havsvattennivå över uppmätt (cm)	Högsta nivå (cm)	Lägsta nivå (cm)
RCAO-E/A2	Enligt dom	1 370	0	464	417
RCAO-E/A2	Enligt dom	1 370	46	465	419
RCAO-H/A2	Enligt dom	1 370	0	464	417
RCAO-H/A2	Enligt dom	1 370	46	465	418

Vi såg att en avbördning på 1 010 m^3/s respektive 1 370 m^3/s klarade av att hålla Mälarens vattennivå under vattendomens eftersträvade högsta nivå på 470 cm. En liten närmare granskning av diagrammen visade också att vattenståndet i sjön inte ens tangerade 470 cm utan sänktes en bit under denna nivå. Detta innebar att det fanns en avtappning för respektive inflöde som gav en vattennivå nära 470 cm (fall 24 – 27 i tabell 4). Var och en av dessa två avtappningar uppnådde även ett maximalt värde, det vill säga en maximal avtappning som ledde till att vattenståndet tangerade nivån 470 cm (figur 23). För RCAO-E/A2 var detta värde 1 262 m^3/s och för RCAO-H/A2 var det 983 m^3/s. Vid beräkningar av dessa avbördningar togs hänsyn till en förhöjd havsvattennivå.



Figur 23. Nödvändig avtappning för att hålla Mälarens vattenstånd under 470 cm i inflödesscenarierna RCAO-E/A2 respektive RCAO-H/A2 i kombination både med uppmätt (W_s +0 cm) och med förhöjd (W_s +46 cm) havsvattennivå. Avtappningen följde vattendomen. Den är angiven i m^3/s. Den övre gröna linjen markerar avbördningen 1 370 m^3/s och den nedre avbördningen 1 010 m^3/s.

När det gällde Mälarens vattenstånd vid högre nederbörd, det vill säga med ett procentuellt påslag på inflödet, gick stora skillnader att se jämfört med avbördningsmängden 1 010 m^3/s. En avbördning utökad till 1 370 m^3/s gav helt andra resultat för alla fem nederbördssituationer. Denna avtappning klarade nämligen av att hålla vattenståndet under 470 cm i samtliga fall (figur 24). Inga långa perioder med höga vattennivåer observerades och ingen stor linjär höjning av vattennivån fanns för dessa nederbördsökningar.

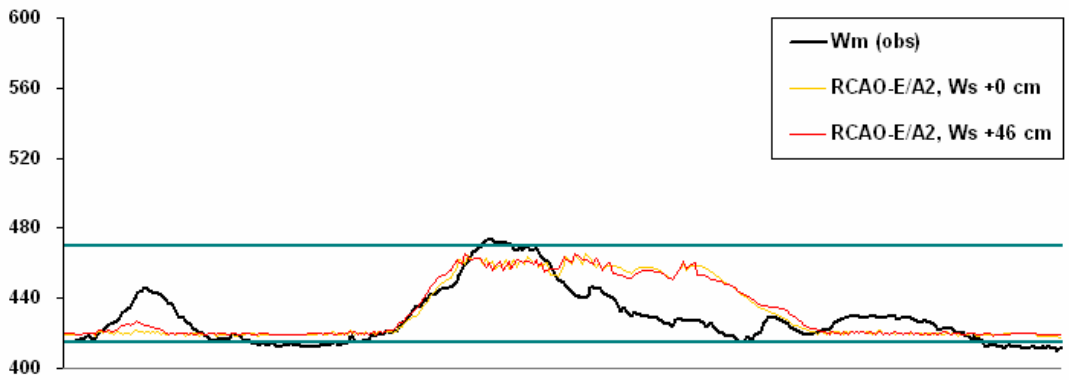


Figur 24. Beräknade vattennivåer i Mälaren (W_m) med indata till Mälarmodellen i form av en procentuell ökning av det observerade inflödet i kombination med avbördningen 1 370 m^3/s. Vattennivån är angiven i centimeter i Mälarens höjdsystem.

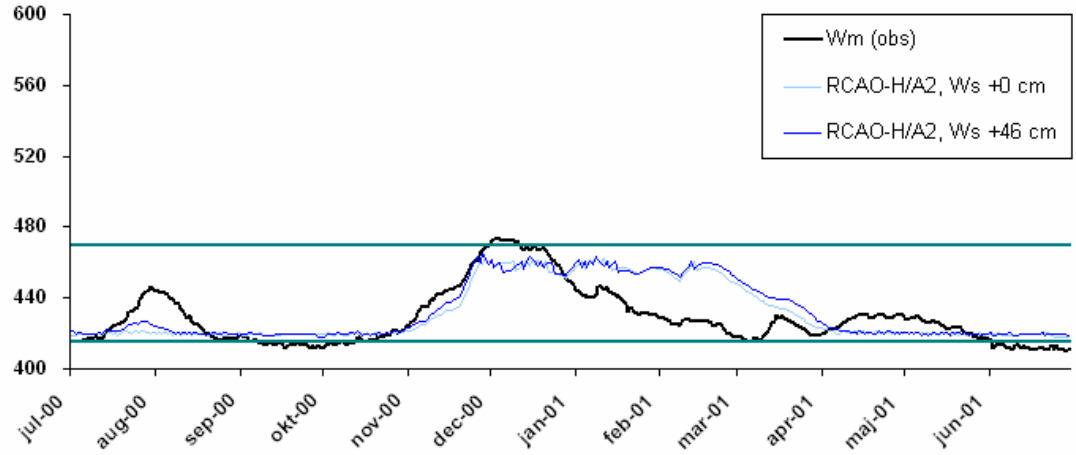
Med avbördningsmängden 1 370 m^3/s kunde Mälarens vattenstånd hållas under 470 cm också i det fall då inflödet motsvarade nederbörden över Centraleuropa (figur 20).

4.3.4 Avbördningsförmåga utökad till 1 500 m^3/s

Avbördningen 1 500 m^3/s studerades dels med inflödet motsvarande nederbörden över Centraleuropa i juli 1997 (fall 49 i tabell 4) och dels med inflöde både från RCAO-E/A2 och från RCAO-H/2, i kombination med uppmätt respektive förhöjd havsvattennivå (fall 20 – 23 i tabell 4). Resultaten från dessa simuleringar var i stort sett likadana som resultaten från undersökningarna med avbördningen 1 370 m^3/s (tabell 14). I båda inflödesfallen kunde vattennivån hållas under 470 cm (figur 25). I fallet 1997 visade sig skillnaden i resulterande vattennivå mellan avbördningen 1 370 m^3/s och 1 500 m^3/s vara endast marginell. I fallen med inflöde från RCAO-E/A2 respektive RCAO-H/A2 sammanföll en hög havsvattennivå endast med en marginellt högre vattennivå i Mälaren och perioden med höga vattennivåer förlängdes.



(a)



(b)

Figur 25. Beräknade vattennivåer i Mälaren med inflödesscenarier från (a) RCAO-E/A2 respektive (b) RCAO-H/A2 i kombination med avbördningen 1 500 m^3/s och i kombination med uppmätt (W_s +0 cm) respektive förhöjd (W_s +46 cm) havsvattennivå. Vattennivån är angiven i centimeter i Mälarens höjdsystem.

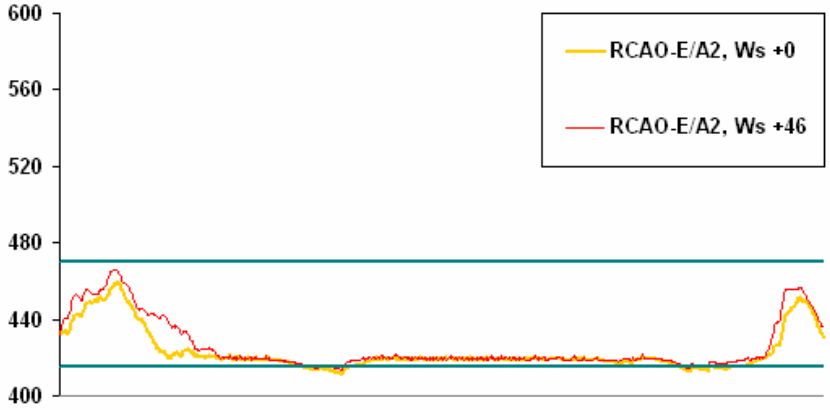
Tabell 14. Beräknad högsta respektive lägsta vattennivå i Mälaren under perioden 2000 – 2001 vid inflödesscenarier från RCAO-E/A2 respektive RCAO-H/A2 i kombination med avbördningen 1 500 m^3/s. Både uppmätt och förhöjd havsvattennivå undersöktes.

Inflöde (m^3/s)	Avtappning enligt dom eller tidigarelagd	Avbördning (m^3/s)	Havsvattennivå över uppmätt (cm)	Högsta nivå (cm)	Lägsta nivå (cm)
RCAO-E/A2	Enligt dom	1 500	0	466	418
RCAO-E/A2	Enligt dom	1 500	46	466	419
RCAO-H/A2	Enligt dom	1 500	0	464	418
RCAO-H/A2	Enligt dom	1 500	46	465	418

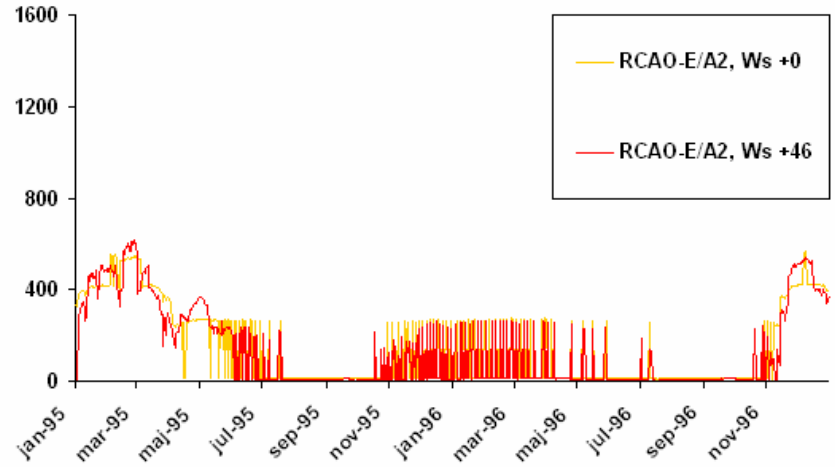
När det gällde fallet med nederbörd motsvarande den som föll över Centraleuropa visade sig skillnaden i resulterande vattennivå mellan avtappningsmängderna 1 370 m^3/s och 1 500 m^3/s också vara marginell (figur 20). Under årets alla andra månader än juli användes observerat inflöde som indata till Mälarmodellen.

4.3.5 Period med liten tillrinning till Mälaren

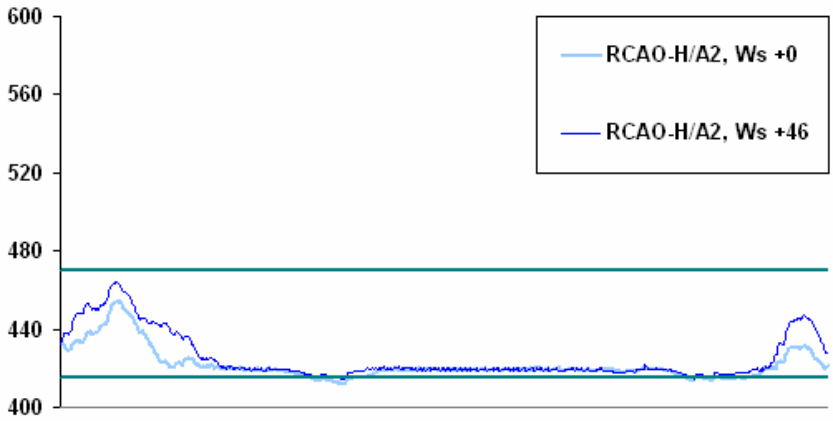
Under åren 1995 – 1996 var tillrinningen till Mälaren enligt båda RCAO-scenarierna liten (fall 58 – 61 i tabell 4). Det visade sig dock att Mälarens vattenstånd inte sjönk till särskilt låga nivåer trots det knappa inflödet (figur 26a-b). Regleringen höll alltså vattnet kvar inne i sjön, vilket gick att se genom att alla Mälarens utskov hölls stängda vissa perioder (figur 26c-d).



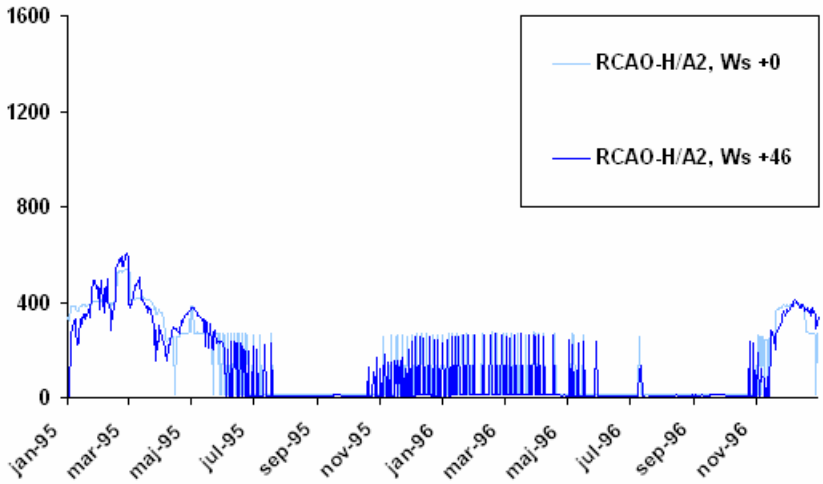
(a)



(c)



(b)



(d)

Figur 26. Beräknade vattennivåer i Mälaren med inflöde från (a) RCAO-E/A2 respektive (b) RCAO-H/A2 i kombination med uppmätt (W_s +0 cm) respektive förhöjd (W_s +46 cm) havsvattennivå. Avtappningen skedde enligt dagens avbördningsförmåga. Vattennivån är angiven i centimeter i Mälarens höjdsystem. Avtappning under perioden 1995 - 1996 i scenariot (c) RCAO-E/A2 respektive (d) RCAO-H/A2. Notera de perioder då inget utflöde sker. Avtappningen är angiven i m^3/s.

4.4 SAMMANFATTNING AV DE VIKTIGASTE RESULTATEN

Analyserna av historiska data visade att de högsta vattennivåerna i Mälaren förekommer under våren följt av vintern och att den högsta havsvattennivån inträffar under vintern. Resultaten visade även att det finns en samvariation mellan vattenståndet i Mälaren och havsvattennivån. En hög havsvattennivå sammanföll nämligen med ett högt vattenstånd i Mälaren. Reglering av det naturliga flödet fick en förhållandevis stor påverkan på vattennivån i Mälaren. De allra högsta vattenstånden sänktes men framförallt höjdes de låga vattennivåerna. Under början av 1900-talet överskred vattennivån i Mälaren vattendomens högsta föreskrivna nivå ett flertal gånger, även i de fall då det naturliga flödet reglerades enligt dagens bestämmelser. Detta visar att händelsen år 2000/01, då vattenståndet uppgick till 473 cm, inte var unik.

Dagens avbördningsförmåga från Mälaren uppgår till 710 m^3/s och är inte tillräcklig för att det i dagens klimat, men framförallt i de klimatscenarier som har undersökts i det här arbetet, ska gå att hålla Mälarens vattennivå under vattendomens högsta föreskrivna nivå på 470 cm. Med en utökad avtappningskapacitet till 1 370 m^3/s skulle det dock i alla undersökta scenarier vara möjligt att hålla vattenståndet under 470 cm (tabell 15).

Tabell 15. Sammanställning av undersökta kombinationer av inflödesscenarier och studerade utökningar av Mälarens utlopp för att visa vid vilka kombinationer som vattennivån i sjön överstiger vattendomens högsta föreskrivna nivå. Inflödesscenarierna är grupperade i fyra grupper: inflöde från RCAO-E/A2, RCAO-H/A2, procentuella ökningar av det observerade inflödet och inflöde motsvarande nederbörden över Centraleuropa.

Inflödesscenario	Avtappningsalternativ (m^3/s)				Mälarens nivå under 470 cm	
	710	1 010	1 370	1 500	uppnås	uppnås inte
RCAO-E/A2	X					X
RCAO-H/A2	X					X
Q_{in}(obs) + %-ökning	X					X
Q_{in}(obs) + Europa	X					X
RCAO-E/A2		X				X
RCAO-H/A2		X			X	
Q_{in}(obs) + Europa		X				X
RCAO-E/A2			X		X	
RCAO-H/A2			X		X	
Q_{in}(obs) + %-ökning			X		X	
Q_{in}(obs) + Europa			X		X	
RCAO-E/A2				X	X	
RCAO-H/A2				X	X	
Q_{in}(obs) + Europa				X	X	

5 DISKUSSION

Mälarmodellens precision undersöktes endast för åren 2000/01 innan den började tillämpas. En nackdel med detta var att vattendomen frångicks under just denna tidsperiod och att modellen strikt följde domen. Det medförde att modellen under denna period inte hade någon möjlighet att helt stämma överens med verkliga förhållanden. Vattendomen frångicks för att förhindra alltför höga vattennivåer i Mälaren. Detta visades i modellen i och med att de enligt domen beräknade höga vattenstånden blev mycket högre än motsvarande uppmätta vattennivåer. Trots att inga andra tidsperioder användes för att studera Mälarmodellens exakthet var det ändå rimligt att anta att den klarade av att återskapa höga vattennivåer förhållandevis väl eftersom dessa till stor del berodde av utskovens öppningsvillkor som fanns inlagda i modellen. Det var dock svårare att bedöma hur precist modellen beräknade de lägsta vattennivåerna eftersom det enda jämförelsematerialet utgjordes av en period när det inte var meningen att modellerad och beräknad vattennivå skulle överensstämma.

Analyserna av historiska data visade att vattenståndet i Mälaren generellt sett följde ett jämnt mönster och uppvisade de högsta nivåerna under april – juni. Även under december och januari inträffade höga vattennivåer, medan låga nivåer inföll i augusti – oktober. Detta mönster gick även att fastställa med den statistiska beräkningen. Rent visuellt gick det dock att påvisa flera år då vattenståndet avvek från detta mönster. Som ett exempel kan nämnas år 2000 då vattenståndet antog sin högsta nivå under december månad (VBB VIAK, 2001). Vattennivån i Mälaren beror naturligtvis till stor del av inflödet till sjön. Dagens inflöde följer ungefär samma mönster som vattennivån. En vårflod med höga flöden inträffar under april – maj. Efter denna kommer en period med låga flöden under sommaren och ett mindre högvatten under hösten. Under vintern råder lågvatten igen (Ehlert, 1970). En skillnad mellan inflöde och nivå var ändå att nivån var hög under vintern då inflödet var lågt. Troligtvis kan detta bero på att regleringen hindrar vattnet från att okontrollerat flöda ut ur Mälaren. Detta mönster avseende inflöde är det som råder idag, men undersökningar tyder på att det kan komma att ändras. Istället för att under året ha två perioder med högre flöden och två perioder med lägre, är det möjligt att vi får se en period med höga flöden och en med låga (Persson m fl, U. å[9].). De höga flödena kommer att inträffa under vinterhalvåret och de låga under sommarhalvåret. Denna förändring gick också att se i resultaten från simuleringarna med Mälarmodellen. Både under åren 2000/01 i scenarierna och under åren 1995/96 i scenarierna inföll de högsta vattenstånden under vintern, inte under våren. Beräkningar genomförda av Persson m fl (U. å.) visar även stora förändringar i 100-årsflöden jämfört med idag. I framtiden är det möjligt att dagens 100-årsvårflöde, januari – juni, får en återkomsttid på 200 – 500 år, och höstens, juli – december, får en återkomsttid på endast 10 – 25 år. De lägre siffrorna gäller för RCAO-E/A2 och de högre för RCAO-H/A2. Tvärt emot vad som råder idag kan höstens 100-årsflöden komma att vara högre än vårens i framtiden. Ytterligare studier skulle därför kunna vara att undersöka hur vattenståndet i Mälaren kommer att variera med årstiderna och med inflödet i framtiden. Persson m fl (U. å.) beskriver också att sommarens flöden kan komma att bli mindre i framtiden jämfört med

[9] Utan år

idag. Därför skulle det vara av intresse att beräkna 100-årsflöden avseende låga flöden och undersöka framtida återkomsttider.

När det gäller samspelet mellan Östersjöns och Mälarens vattenstånd gick resultaten isär. Det gick att se att havsvattennivån varierade enligt ett mönster, men detta mönster kunde inte säkerställas statistiskt. Någonting som dock bör uppmärksammas är att havet generellt sett antar höga nivåer under vintern, och speciellt den lilla höjning av havsvattennivån som ändå gick att se under december och januari. Denna höjning i kombination med framtida hög tillrinning till Mälaren under vinterhalvåret skulle kunna leda till problem. Störst risk för översvämning borde alltså i framtiden föreligga under vintern. Resultaten från Mälarmodellen med indata från RCAO uppvisade också högt vattenstånd under vintern för åren 2000/01 respektive 1995/96.

Ett annat problem med höga havsvattennivåer är att avtappningen från Mälaren bygger på nivåskillnader i vattenstånd mellan sjön och havet (Samuelsson, 1985). Ju högre över havets nivå som Mälarens yta befinner sig desto mer vatten kan avbördas. Stor tillrinning till Mälaren utgör en grund för behov av hög avtappning men en hög havsvattennivå sänker möjligheten till detsamma. I analyserna av historiska data gick det att se just detta. På grund av landhöjningen befann sig havsvattennivån ungefär 40 cm högre upp i början av 1900-talet än vad den gör idag. Detta innebär att tröskeln mellan Mälaren och Östersjön var mycket lägre för 100 år sedan än idag. En simulerad höjning av havsvattennivån under det tidiga 1900-talet gav också ett relativt kraftigt utslag på Mälarens vattenstånd. År 1903 – 1916 och år 1924 befann sig havsvattennivån på grund av landhöjningen över det beräknade medelvärdet för 1900-talet. Sambandet mellan en hög havsvattennivå och Mälarens vattenstånd syntes också tydligt under dessa perioder. En pålagd höjning av havsvattennivån med 46 cm utanför Stockholm (Meier m fl, 2004) på den uppmätta havsvattennivån under början av 1900-talet går dock inte att jämföra med den förväntade havsvattennivåhöjningen till följd av klimatförändringar. En höjning av havsvattennivån med 46 cm i början av 1900-talet, när havsvattennivån på grund av landhöjningen befann sig ungefär 40 cm högre än idag, motsvarar en höjning av dagens havsvattennivå med ungefär 86 cm. Klimatförändringar förväntas inte komma att kunna åstadkomma en så stor höjning av havsvattennivån utanför Stockholm (Persson, 2005, muntligt besked). Det en klimatförändring dock skulle kunna orsaka är att havsvattennivån höjs så pass mycket att den överstiger landhöjningen. Då skulle tröskeln mellan Mälaren och havet minska istället för att öka, vilket skulle resultera i en trögare avbördning från Mälaren. Den simulerat högre havsvattennivån under åren 2000/01 och 1995/96 motsvarar på grund av landhöjningen ungefär den havsvattennivå som rådde under början av 1900-talet. Med detta i åtanke är det inte så konstigt att havsvattennivåhöjningen dessa år inte sammanföll med annat än en marginell höjning av Mälarens vattenstånd.

Åren 1903 – 1916, 1924/25, 1995/96 och 2000/01 utgjorde naturligtvis ett alltför litet antal studerade fall för att det skulle gå att dra några generella slutsatser, men de visade ändå att det skulle kunna finnas ett samband mellan hög havsvattennivå och högt vattenstånd i Mälaren, trots att de statistiska beräkningarna inte påvisade ett sådant samband efter det att regleringen av Mälaren infördes. Resultaten behöver dock

nödvändigtvis inte stå emot varandra. Den statistiska beräkningen undersökte om nivåerna i Mälaren respektive havet följdes åt, det vill säga om nivån i Mälaren var hög när den även var det i havet och motsvarande för låga nivåer. Att det finns ett statistiskt samband mellan nivåerna innebär dock inte att det även finns ett orsakssamband mellan dem. Det är därför tänkbart att det kan förhålla sig så att en hög havsvattennivå förhindrar hög avtappning vilket leder till högt vattenstånd i Mälaren, men eftersom sjön ändå är reglerad och eftersom det handlar om en stor sjö sammanfaller inte vattenstånden i havet och i sjön tillräckligt väl för att det skulle ge utslag i statistiken.

Mälaren har varit reglerad fullt ut sedan 1968 (Ehlert, 1970) och resultaten i det här arbetet visade att regleringen har påverkat vattenståndet markant. Under perioden 1903 – 1916 som hade höga flöden, överskreds nivån 470 cm hela 13 gånger. Dagens reglering skulle ha sänkt detta antal till en gång. Även för perioden 1932 – 1942, som representerade låga flöden, överskreds vattenståndet 470 cm så mycket som fyra gånger. Någonting som dock är viktigt att poängtera är att i båda fallen höjdes de låga vattenstånden avsevärt. Detta är nämligen vattendomens huvudsyfte (Ehlert, 1970), som alltså har uppfyllts. Värt att notera är också att vattennivån under 1900-talets första hälft var så hög vid ett flertal tillfällen. Det visade att händelsen år 2000/01, då nivån steg till 473 cm, egentligen inte var särskilt anmärkningsvärd; liknande och till och med värre situationer har inträffat flera gånger förut. En möjlig anledning till att händelsen år 2000/01 trots allt tilldelades så stor uppmärksamhet kan vara att en översvämning idag troligtvis skulle komma att få mycket större konsekvenser än en översvämning under första hälften av 1900-talet fick. En orsak till detta kan vara att stränderna kring Mälaren idag är mycket mer bebyggda än tidigare. Någonting annat som gör Stockholm mera sårbart idag att infrastrukturen inte är anpassad till potentiella översvämningar.

År 2000/01 frångicks vattendomen för att förhindra översvämning av Mälarens stränder. Resultaten i det här arbetet visade också att Mälarens vattenstånd skulle ha stigit nästan 20 cm över domens högsta föreskrivna nivå om ingen åtgärd hade vidtagits. Det var alltså inte helt ogrundat som Stockholms Hamn AB öppnade vissa slussar tidigare än föreskrivet. En utbyggd avbördningsförmåga hade däremot kunnat hålla Mälarens vattenstånd under 470 cm även om vattendomen hade följts. De höga vattennivåer som skulle ha blivit resultatet om domen hade följts skulle dock kunna motivera en förändring av den, vilket Länsstyrelserna i Mälardalslänen också vill åstadkomma (Länsstyrelsen i Stockholms län, 2002). Endast en liten förändring av domen åstadkommer dock inte en tillräcklig sänkning av vattenståndet, varken med dagens eller med morgondagens inflöde. För att i framtiden sänka Mälarens vattenstånd måste en utbyggnad av sjöns utlopp genomföras.

Dagens avbördningsförmåga på 710 m^3/s klarade inte av att i något av de undersökta scenarierna med högt inflöde till Mälaren hålla sjöns vattenstånd under vattendomens högsta föreskrivna nivå på 470 cm. I de flesta av fallen steg vattennivån över fem meter vilket till och med är högre än det för Mälaren beräknade vattenståndet med 100 års återkomsttid (Räddningsverket, 2001). Ett påslag på dagens nederbörd med 30 % i kombination med nuvarande avtappningsförmåga resulterade i vattenståndet 532 cm. Detta är två centimeter lägre än det vattenstånd som erhölls om nederbörden över

Centraleuropa i juli 1997 kombinerades med avbördningsmängden 710 m^3/s. Resultaten visade alltså att en utbyggnad av utskoven från Mälaren är nödvändig. Det första utökningsalternativet som undersöktes i det här arbetet innebar en utökning av avbördningen till 1 010 m^3/s. Det visade sig dock att denna utökning i de flesta scenarier var för liten för att kunna hålla Mälarens vattennivå inom acceptabla gränser. Det var nämligen endast i scenariot med inflöde från RCAO-H/A2 som vattenståndet inte översteg 470 cm under den undersökta tidsperioden. Det andra utbyggnadsalternativet, som innebar en utökning till 1 370 m^3/s, var dock tillräckligt för att i alla scenarier med högt inflöde sänka vattenståndet så mycket att det understeg 470 cm. Skillnaderna i resulterande vattennivå mellan detta alternativ och det tredje alternativet – utökning av avbördning till 1 500 m^3/s – var inte markanta. Slutsatsen som kan dras är alltså att för att det även framgent ska vara möjligt att hålla Mälarens vattenstånd under en rimlig nivå måste sjöns utlopp utökas. En utbyggnad till 1 370 m^3/s vore det bästa alternativet av dem som har undersökts i det här arbetet. Det innebär en utbyggnad av avbördningen med 660 m^3/s, vilket alltså nästan motsvarar en fördubbling av dagens avtappningskapacitet.

Någonting som dock är viktigt att komma ihåg är att denna slutsats endast gäller för just de tidsperioder som har studerats. En intressant notering i sammanhanget är också att resultaten i det här arbetet pekar på att behovet av framtida avtappningskapacitet uppgår till 1 370 m^3/s, men att det enligt Länsstyrelsen i Stockholms län (2002) uppgår till 1 500 m^3/s. Visserligen är denna avbördningsmängd grundad på att kunna hålla Mälarens vattenstånd under 563 cm, men resultaten i det här arbetet visade att avbördningen 1 370 m^3/s är tillräcklig för att det ska gå att hålla vattennivån under 470 cm. Det verkar alltså inte vara nödvändigt att bygga ut avbördningen till mer än 1 370 m^3/s. Eftersom en utbyggnad utgör en stor ekonomisk fråga är det motiverat att ta reda på varför resultaten i det här arbetet skiljer sig åt från resultaten från Länsstyrelsen i Stockholms än (2002).

I scenariot med liten tillrinning till Mälaren hölls alla sjöns utskov stängda under flera dagar i rad för att vattenståndet inte skulle sjunka till oacceptabelt låga nivåer. En nackdel med att stänga inne vattnet i sjön är dock att vattenkvaliteten då riskerar att försämras. Det är viktigt att kunna hålla en bra vattenkvalitet i Mälaren eftersom sjön utgör dricksvattentäkt för ett väldigt stort antal människor. Ytterligare ett problem med för låga vattennivåer är risk för saltvatteninträngning. Saltvatteninträngning kan ske då havsvattennivån befinner sig högre än Mälarens nivå och orsakar i regel en tydlig höjning av salthalten en bit in i Mälaren (Lännergren, 2004, muntligt besked). Mellan år 1970 och år 2002 har en markant höjning av salthalten i Mälaren uppmätts vid fem tillfällen. Efter år 2002 har ingen saltvatteninträngning skett (Lännergren, 2004, muntligt besked). Det är dock möjligt att saltvatteninträngning kan komma att bli vanligare i framtiden. Om klimatförändringar bidrar till att sänka tröskeln mellan havet och Mälaren mer än vad landhöjningen bidrar till att höja den, skulle det kunna finnas risk för att saltvatteninträngning kan komma att bli allt vanligare.

6 SLUTSATS

Mälarens utlopp måste byggas ut för att det i dagens klimat ska vara möjligt att hålla vattenståndet under vattendomens högsta föreskrivna nivå. De framtidsscenarier som har undersökts i det här arbetet ger ytterligare skäl till att utbyggnad krävs. I dessa scenarier kan vattennivån hållas under vattendomens högsta föreskrivna nivå om avbördningen byggs ut till 1 370 m^3/s. Det krävs alltså nästan en fördubbling av dagens avbördningskapacitet på 710 m^3/s.

7 VIDARE STUDIER

Om slutsatsen i det här arbetet ska kunna gälla för fler än de undersökta situationerna är det viktigt att fler scenarier med högt inflöde studeras. Det är nämligen troligt att andra förlopp än de som har studerats i det här arbetet kan inträffa i framtiden Det vore också intressant att titta närmare på de beräkningsförutsättningar som ligger till grund för slutsatsen från Länsstyrelsen i Stockholms län (2002). Eftersom denna slutsats skiljde sig från slutsatsen i det här arbetet vore det bra att ta reda på vari skillnaden ligger.

Då resultat pekar på att inflödet till Mälaren kan komma att förändras med årstiderna i framtiden skulle det vara intressant att undersöka om det är möjligt att även vattenståndet i sjön undergår samma förändring. Det är även troligt att vattenflödena under sommaren kan komma att bli ännu lägre än vad de är idag, varför det skulle vara av intresse att beräkna 100-årsflöden avseende låga flöden och undersöka framtida återkomsttider. I samband med detta kan en studie avseende risk för saltvatteninträngning i samband med framtida låga vattenstånd i Mälaren genomföras.

REFERENSER

Tryckta referenser

Andréasson, J., Bergström, S., Carlsson, B., Graham, L. P. & Lindström, G. (2004). Hydrological Change – Climate Change Impact Simulations for Sweden. *Ambio*, 33(4 – 5), 228 – 234. ISSN 0044-7447

Djurfeldt, G., Larsson, R. & Stjärnhagen, O. (2003). *Statistisk verktygslåda*: *samhällsvetenskaplig orsaksanalys med kvantitativa metoder*. Lund: Studentlitteratur. ISBN 91-44-04147-0

Dom 1989-10-20, Stockholms tingsrätt. Avd 9, Vattendomstolen

Ehlert, K. (1970). *Mälarens hydrologi och inverkan på denna av alternativa vattenavledningar från Mälaren*. SMHI. Notiser och preliminära rapporter. Serie hydrologi nr 8. ISSN 0586-1659

Flödeskommittén. (1990). *Riktlinjer för bestämning av dimensionerande flöden för dammanläggningar*: *slutrapport från Flödeskommittén*. Statens Vattenfallsverk, Svenska Kraftverksföreningen, SMHI.

Graham, L. P. (2004). Climate Change Effects on River Flow to the Baltic Sea. *Ambio*, 33(4 – 5), 235 – 241. ISSN 0044-7447

Granström, C. (2003). Vattenståndsmätningar i Mälaren. *Väder och Vatten*, (8). ISSN 0281-9619

Jakobsson, E. (2003). Kan en sjö ha en historia? *Mälardalens vattenvägar i ett industrihistoriskt perspektiv*. s 11-23. ISBN 91-85268-93-3

Jakobsson, E. (1999). Konfliktlinjer i svensk vattenhistoria. Från *Bergslag och bondebygd*. s. 10-21. ISSN 0347-6766

Johnson, R. A. (2000). *Miller and Freund´s Probability and statistics for engineers*. 6:e uppl. Upper Saddle River: Prentice-Hall, Inc. ISBN 0-13-014158-5

Luthander, P. (2003). Slussen korkar igen Mälaren vid översvämning. *Dagens Nyheter* (2003-02-20), s. A8

Länsstyrelsen i Stockholms län. (2002). Behov av utökad kapacitet för avtappning från Mälaren. Dnr 2234-02-5651

Meier, H. E. M., Broman, B. & Kjellström, E. (2004). Simulated sea level in past and future climates of the Baltic Sea. *Climate Research*. 27(1), 59 – 75. ISSN 0936-577X

Nakićenović, N. (2000). *Special Report on Emissions Scenarios*. Cambridge: Cambridge University Press. ISBN 0-521-80081-1

Persson, G., Graham, L., P., Andréasson, J. & Meier, M. (U. å.). Impact of Climate Change Effects on Sea-Level Rise in Combination with an Altered River Flow in the Lake Mälaren Region. SMHI.

Persson, G. (red). (2003). *Klimatmodellering och klimatscenarier ur SWECLIMs perspektiv*. SMHI. SMHI Rapporter Meteorologi och klimatologi nr 102. ISSN 0347-2116

Räddningsverket. (2001) Översiktlig översvämningskartering för Mälaren. Rapport 22, 2001-10-23.

Samuelsson, M. (1985). Avbördningsformler för utskoven i Mälaren. SMHI. PM 1985-02-14

Seareg. (2004a). Seareg Nyhetsbrev 1(1)

Seareg. (2004b). Seareg Nyhetsbrev 1(2)

Seareg. (2004c). Seareg Nyhetsbrev 1(3)

SFS 1998:808. Miljöbalk

SMHI. (2003). Analys av tidigarelagd tappning från Mälaren vid vattenstånd högre än 4.40 m. Dnr 2003/1976/204

SMHI. (1997). Vattenståndsberäkning för Mälaren. Dnr 9708-0999/204

Stockholms Hamn AB. (2000). Höjdsystem i Stockholm

Sundström, A. (2004). Skyfall kan fylla Gamla stans t-bana. *Dagens Nyheter* (2004-12-01), s. A16

VBB VIAK. (2001). Mälarens reglering. Stockholm. Uppdragsnummer 1942183-001

Internetreferenser

Lantmäteriverket. (2004a). Första precisionsavvägningen och Rikets Höjdsystem 1900. URL: http://www.lantmateriet.se/sok_index.asp?q=M%E4larens+h%F6jdsystem (2004-09-14)
Lantmäteriverket. (2004b). Höjdsystem. URL: http://www.lantmateriet.se/cms/niva2index.asp?produktgrupp=203 (2004-09-14)

Mälarens vattenvårdsförbund. (2004). Mälaren en sjö för miljoner. URL: http://www1.vasteras.se/malarensvattenvardsforbund/miljon.htm (2004-11-19)

Stockholms stad. (2004a). Tävling. URL: http://www.stockholm.se/templates/template_121.asp?mainframe=template_117.asp?number=1451&category=475 (2005-01-05)

SMHI. (2005a). HBV – Welcome to the Homepage of the Original HBV – Model. URL: http://www.smhi.se/foretag/m/hbv_demo/html/welcome.html (2005-01-25)

SMHI. (2005b). The HBV model. URL: http://www.smhi.se/sgn0106/if/hydrologi/hbv.htm (2005-01-25)

SMHI. (2005c). The RCAO model. URL: http://www.smhi.se/sgn0106/if/rc/rcao.htm (2005-01-26)

Stockholms stad. (2004b). Stadsbyggnadskontoret, Stockholmskartan. URL: http://www.map.stockholm.se/kartago/kartago_fr_sth.html (2005-02-10)

Svenska Akademiens ordbok. (2005). Sökning på uppslagsord, för-. URL: http://g3.spraakdata.gu.se/osa/show.phtml?filenr=1/81/20608.html (2005-01-20)

Södertälje kommun. (2004). WebbGis Södertälje. URL: http://www.kartor.sodertalje.se/Scripts/hsrun.exe/Kartor/WebInfo/mapxtreme.htx;start=initX?br=xx&ID=0.054060590819554444 (2005-01-10)

Vattenportalen. (2004). Vattendistrikt. URL: http://www.vattenportalen.se/ (2005-01-20)

Muntliga referenser

Abrahamsson, J., utvecklingsingenjör, Stockholm Vatten. 2004-07-05

Bergström, H., ingenjör vid Hamn- och Trafikenheten, Stockolms Hamn AB. 2004-12-02

Bertilson, R. B., nautisk expert, Sjöfartsverket. 2005-01-24

Broman, B., förste statsoceanograf, SMHI. 2004-12-13

Graham, L. P., docent, SMHI. 2005-01-27

Granström, C., hydrolog, SMHI. 2005-01-12

Hällgren, L., projektledare, Riksdagsförvaltningen. 2005-02-03

Lännergren, C., limnolog, Stockholm Vatten. 2004-09-25

Persson, G., fil. dr., SMHI. 2004-11-08, 2005-01-18

BILAGA A

Intervjufrågor till Hans Bergström på Stockholms Hamn AB

Följande frågor diskuterades:

- Vem fattar beslut om att börja tappa vatten vid lägre vattenstånd än vad som anges av vattendomen? Vem är i vanliga fall ansvarig för avtappningen?
- Hur fungerar beslutsordningen?
- Om vatten börjar tappas tidigare än vad vattendomen medger, hur mycket tidigare sker det?
- Vilka kriterier ligger till grund för beslutet?
- Hur ofta avviker tappningen från vattendomen?
- Finns det tekniska problem som gör att slussarna inte kan öppnas/stängas efter behov?
- Sker någon samordning med myndigheter innan avvikelse från vattendomen görs? Har ni skyldighet att kontakta vissa myndigheter?
- Har Stockholms Hamn AB ansvar för samtliga slussar?
- Mäter ni saltvattenhalt?
- Hur ofta hålls Södertälje kanal öppen?

BILAGA B

Avbördningsekvationer för Mälarens utskov

Avbördningsekvationer för Mälarens utskov (figur B:1). Det extra utskov som i vissa fall lades till i Mälarmodellen styrdes av ekvation B:1. Beteckningarna förklaras i Samuelsson (1985).

$$Q_{ut} = b * h_1 * \sqrt{2g * (h - h_1)} \qquad \text{(B:1)}$$

Figur B:1. Avbördningsekvationer för Mälarens utskov.

SMHI
HOa
M Samuelsson,aj

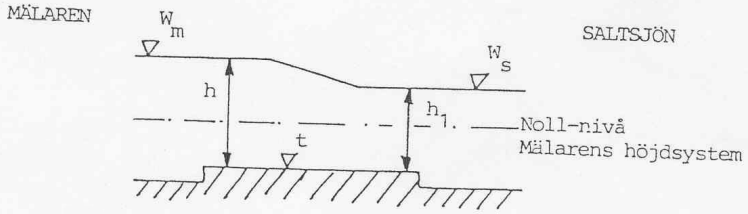
PM 1985-02-14

61 Mälaren. Avbördningsformler för utskoven i Mälaren

Sammanställning av de avbördningsformler som ligger till grund för de tabeller och diagram som för närvarande används vid tappningsberäkningen.Underlag för framtagning av dataprogram för tappningsberäkning.

Beteckningar:

b = utskovets bredd (m)
t = tröskelhöjd (Mälarens höjdsystem)
W_m = vattenstånd i Mälaren (Mälarens höjdsystem)
W_s = vattenstånd i Saltsjön (Mälarens höjdsystem)
h = vattenstånd över tröskeln på Mälarsidan
h_1 = vattenstånd över tröskeln på Saltsjösidan



1 RIKSBRODAMMEN

b = 44 m

a) Helt stängd: t = +4.20 m

$W_m < +4.20$: $Q_{läck} = 13.6 \cdot \sqrt{W_m - W_s}$ (ny läckvattenkurva enl 76 och 83/84 års mätningar)

$W_m > +4.20$: $Q = Q_{läck} + Q_{överströmning}$ enl punkt b) men med den nya läckvattenkurvan

b) Delvis öppen:

$Q = Q_{läck} + Q_{överströmning}$

$Q_{läck} = 19,7 \cdot \sqrt{W_m - W_s}$ (1971 års läckvattenkurva)

$Q_{överströmning} = \frac{2}{3} \cdot \mu \cdot b \cdot h \cdot \sqrt{2gh} \cdot$

$\mu = 0.6$

$c = 1$ om $\frac{h_1}{h} < 0.5$

c = 0.96	om $\frac{h_1}{h}$ =	0.50-0.64
0.93	"	0.65-0.74
0.65	"	0.75-0.79
0.59	"	0.80-0.84
0.49	"	0.85-0.89
0.39	"	0.90-0.93
0.29	"	0.94-0.96
0.20	"	0.97
0.14	"	0.98
0.07	"	0.99
c = 0	om $\frac{h_1}{h}$ =	1.00

om $\frac{h_1}{h} > 1$: inströmning enl $Q_{läck} = 13.6\sqrt{W_s - W_m}$

c) Helt öppen: t = -0,46 m ($h_1 = W_s + 0,46$)

$Q = \mu \cdot b \cdot h_1 \cdot \sqrt{2g \cdot (h - h_1)}$

μ varierar ; beroende av h_1 och $h-h_1$

approx : $\mu = 0.1 \cdot W_s + 1$ där

$h - h_1$	1
< 0.15	-0,10
0.15 - 0.94	-0.08
0.95 - 1.05	-0.07
> 1.05	<-0.06

(Exakta sambandet kan tas fram genom provkörning och anpassning av dataprogrammet.)

2 STALLKANALSDAMMEN

b = 17 m

a) Helt stängd: t = +4.40 m

$W_m < +4.40$: $Q_{läck} = 9.6 \cdot \sqrt{W_m - W_s}$ (ny läckvattenkurva enl 83/84 års mätning)

$W_m > +4.40$: Handräknas

$W_s > W_m$: inströmning enl $Q_{läck} = 9.6 \cdot \sqrt{W_s - W_m}$

b) Helt öppen: t = -3.00 m ($h_1 = W_s + 3.00$)

$Q = \mu \cdot b \cdot h_1 \cdot \sqrt{2g \cdot (h - h_1)}$

μ varierar ; beroende av h_1 och $h - h_1$

för $h-h_1 = 0.3 - 0.9$ gäller approx

$\mu = 0.12 \cdot W_s - 0.21$

(se i övrigt Riksbrodammen)

3 AVTAPPNINGSKANALEN

b = 9.7 m

a) Helt stängd: Q = 0

b) Helt öppen: t = ±0.0 m ($h_1 = W_s$)

$Q = \mu \cdot b \cdot h_1 \cdot \sqrt{2g \cdot (h - h_1)}$

$\mu = 0.76$

c) Delvis öppen: Handräknas

4 KARL-JOHANSSLUSSEN

b = 10 m

a) Helt stängd: Q = 0

b) Helt öppen: t = -0.25 m ($h_1 = W_s + 0.25$)

$Q = \mu \cdot b \cdot h_1 \cdot \sqrt{2g\ (h - h_1)}$

$\mu = 0.81$

5 HAMMARBYSLUSSEN

a) Helt stängd: $Q = 0$ ($Q_{läck} \approx 2.5 \cdot \sqrt{W_m - W_s}$, men läckage och slussvatten räknas f.n inte med

b) Delvis öppen:
(Nedre portparet helt öppet, övre portparet delvis öppet)

$$Q = Q_1 + Q_2 =$$

$$= \mu 2a \cdot \sqrt{2g(h - h_1)} + \mu b \cdot \sqrt{2g} \cdot \left[\frac{2}{3}(h - h_1)\sqrt{h - h_1} + h_1\sqrt{h - h_1}\right]$$

Q_1 = Q i portnischerna bakom slussportarna
Q_2 = Q mellan slussportarna
b = öppningens bredd mellan övre slussportarna (m)
μ = 0.8
t = -2.45 m ($h = W_m + 2.45$; $h_1 = W_s + 2.45$)
a = 4.6 m^2

6 KULVERTEN VID HAMMARBY

a) Helt öppen: $Q = 6{,}7 \cdot \sqrt{W_m - W_s}$

b) Helt stängd: $Q = 0$

7 SÖDERTÄLJE-SLUSSEN

a) Helt stängd: $Q = 0$ (se Hammarby-slussen)

b) Delvis öppen:
(Nedre portparet helt öppet, övre portparet delvis öppet)

$Q = \mu \cdot b \cdot h_1 \cdot \sqrt{2g\,(h - h_1)}$
$t = -3{,}80$ m $(h_1 = W_s + 3{,}80)$
$\mu = 0{,}83$
$b = b_1 + b_2$
b_1 = öppningens bredd mellan övre slussportarna
b_2 = öppningsbredd i portnischerna bakom slussportarna

b_1	b_2
0	0
0.1	0
0.2	0.2
0.3	0.5
0.4	0.7
0.5	1.0
0.6	1.3
0.7	1.5
0.8	1.7
0.9	1.9
1.0	2.2
1.1	2.4
1.2	2.6
1.3	2.8
1.4	2.85
1.5	2.9
2.0	3.2
3.0	3.6
4.0	4.0

8 KULVERTEN VID MAREN I SÖDERTÄLJE

Helt öppen: $Q = 5{,}35 \cdot \sqrt{W_m - W_s}$

BILAGA C

Statistiska beräkningar

ANOVA-test

ANOVA – Analysis of Variance – kan användas för att testa hypotesen att medelvärdena mellan k antal mätserier är lika stora (Johnson, 2000). Som nollhypotes anges att alla medelvärden är lika stora, varvid den alternativa hypotesen innebär att minst ett medelvärde skiljer sig från de övriga. Signifikansnivån, α, i alla beräkningar i det här arbetet valdes till $0{,}05$. Nollhypotesen förkastas om testets beräknade F-värde är större än det tabulerade F-värdet för vald signifikansnivå och $k-1$ respektive $N-k$ frihetsgrader i nämnare respektive täljare. Nödvändiga beräkningar kan sammanfattas i en ANOVA-tabell (tabell C:1). ANOVA-tabeller ställdes upp för Mälarens vattenstånd (tabell C:2) och för havsvattennivån (tabell C:3a-b).

Tabell C:1. ANOVA-tabell.

Source of variation	Degrees of freedom	Sum of Squares	Mean Square	F
Treatments (årstider)	$k-1$	$SS(Tr)$	$MS(Tr) = SS(Tr)/(k-1)$	$\frac{MS(Tr)}{MSE}$
Errror	$N-k$	SSE	$MSE = SSE/(N-k)$	
Total	$N-1$	SST		

Beräkningarna genomförs med hjälp av följande samband (Johnson, 2000):

$N = \sum_{i=1}^{k} n_i$ där n_i utgör observationerna i mätserien k.

$SST = \sum_{i=1}^{k} \sum_{j=1}^{n_i} y_{ij}^2 - C$ där y_{ij} utgör värdena av observationerna i mätserien k.

$SS(Tr) = \sum_{i=1}^{k} \frac{T_i^2}{n_i} - C$ där C är en korrektionsterm som ges av sambandet

$C = \frac{T.^2}{N}$ där $T.$ ges av sambanden

$T. = \sum_{i=1}^{k} T_i$ och $T_i = \sum_{j=1}^{n_i} y_{ij}$.

$SSE = SST - SS(Tr)$

	Observationer			
$Mätserie_1$	y_{11}	y_{12}	y_{1j}	y_{1n_1}
$Mätserie_2$	y_{21}	y_{22}	y_{2j}	y_{2n_2}
$Mätserie_i$	y_{i1}	y_{i2}	y_{ij}	y_{in_i}
$Mätserie_k$	y_{k1}	y_{k2}	y_{kj}	y_{kn_k}

ANOVA-test för Mälarens vattenstånd

Nollhypotes: Alla medelvärden är lika.
Alternativ hypotes: Minst ett medelvärde skiljer sig från de övriga.
Signifikansnivå: $\alpha = 0{,}05$
Förkasta nollhypotesen om $F > 2{,}60$, som är det tabulerade F-värdet för signifikansnivån 0,05 och 3 respektive 400 frihetsgrader i nämnare respektive täljare.

Tabell C:2. ANOVA-tabell för Mälarens vattenstånd.

Source of variation	Degrees of freedom	Sum of Squares	Mean Square	F
Treatments	3	14 185	4 728	17
Errror	400	111 288	278	
Total	403	125 473		

$F = 17 > 2{,}60$ leder till att nollhypotesen kunde förkastas på nivån 0,05.

ANOVA-test för havsvattennivån
Samma årstidsindelning som för Mälaren.

Nollhypotes: Alla medelvärden är lika.
Alternativ hypotes: Minst ett medelvärde skiljer sig från de övriga.
Signifikansnivå: $\alpha = 0{,}05$
Förkasta nollhypotesen om $F > 2{,}60$, som är det tabulerade F-värdet för signifikansnivån 0,05 och 3 respektive 400 frihetsgrader i nämnare respektive täljare.

Tabell C:3a. ANOVA-tabell för havsvattennivån.

Source of variation	Degrees of freedom	Sum of Squares	Mean Square	F
Treatments	3	16 937	5 646	23
Errror	400	98 486	246	
Total	403	115 423		

$F = 23 > 2{,}60$ leder till att nollhypotesen kunde förkastas på nivån 0,05.

ANOVA-test för havsvattennivån
Årstidsindelning med hänsyn tagen till havsvattennivåns stora variationer.

Nollhypotes: Alla medelvärden är lika.
Alternativ hypotes: Minst ett medelvärde skiljer sig från de övriga.
Signifikansnivå: $\alpha = 0{,}05$
Förkasta nollhypotesen om $F > 3{,}00$, som är det tabulerade F-värdet för signifikansnivån 0,05 och 2 respektive 241 frihetsgrader i nämnare respektive täljare.

Tabell C:3b. ANOVA-tabell för havsvattennivån.

Source of variation	Degrees of freedom	Sum of Squares	Mean Square	F
Treatments	2	12 805	6 402	761
Errror	241	2 026	8	
Total	243	14 831		

$F = 761 > 3{,}00$ leder till att nollhypotesen kunde förkastas på nivån 0,05.

Rangordning av medelvärden för Mälarens vattenstånd

Alla medelvärden som undersöktes med ANVOA-test rangordnades även med hjälp av ekvation C:1 (Johnson, 2000).

$$I = (\mu_1 - \mu_2) \pm t_{\alpha/2} \sqrt{MSE\left(\frac{1}{n_1} - \frac{1}{n_2}\right)} \qquad \text{C:1}$$

De medelvärden som jämförs betecknas μ_1 respektive μ_2. Det tabulerade värdet för t-fördelningen på konfidensnivån α betecknas $t_{\alpha/2}$. MSE motsvarar variansen och hämtas från ANOVA-tabellen. Slutligen betecknas antalet observationer i de jämförda mätserierna n_1 respektive n_2. Om noll ligger inom det framräknade konfidensintervallet I är skillnaden mellan μ_1 och μ_2 inte statistiskt signifikant (tabell C:4a-c). Vid alla rangordningar användes konfidensnivån $\alpha = 0{,}05$, vilket innebär att $t_{\alpha/2} = 1{,}96$.

Tabell C:4a. Konfidensintervall för skillnaden mellan medelvärden för Mälarens vattenstånd.

Jämförda årstider	Beräknat intervall	
Vinter – Vår	– 0,18	– 9,4
Vinter – Sommar	11	2,2
Vinter – Höst	15	5,9
Vår – Sommar	16	7,0
Vår – Höst	20	11
Sommar – Höst	8,3	– 0,94

Noll är inom intervallet endast vid jämförelsen mellan sommarens och höstens medelvattenstånd.

Rangordning av medelvärden för havsvattennivån

Samma årstidsindelning som för Mälaren.

Tabell C:4b. Konfidensintervall för skillnaden mellan medelvärden för havsvattennivån.

Jämförda årstider	Beräknat intervall	
Vinter – Vår	20	11
Vinter – Sommar	7,2	– 1,5
Vinter – Höst	4,4	– 4,3
Vår – Sommar	– 8,5	– 17
Vår – Höst	– 11	– 20
Sommar – Höst	1,5	– 7,1

Noll är inom det beräknade intervallet vid jämförelsen mellan vinterns och sommarens nivåer, mellan vinterns och höstens nivåer samt mellan sommarens och höstens nivåer.

Rangordning av medelvärden för havsvattennivån

Årstidsindelning med hänsyn tagen till havsvattennivåns stora variationer.

Tabell C:4c. Konfidensintervall för skillnaden mellan medelvärden för havsvattennivån.

Jämförda årstider	Beräknat intervall	
Vår/försommar – Höst	– 13	– 15
Vår/försommar – Vinter	– 15	– 17
Höst – Vinter	– 1,3	– 3,2

Noll befinner sig inte inom något av intervallen.