SMHI

**Maria Andersson, Kristoffer Hallberg och Sture Lindahl**

**RAPPORT NR 2013-13**

# Saltvatteninträngning i Mälaren



*Pärmbild: Mälartorget i Gamla Stan i Stockholm vid översvämningen våren 1924. Foto:S. Ernfors, SMHI.*

SMHI 2013-13

SMHI

**RAPPORT NR 2013-13**


| Författare: | Uppdragsgivare: | | |
|---|---|---|---|
| M. Andersson, K. Hallberg, S. Lindahl | Norrvatten | | |
| Granskningsdatum: | Granskare: | Dnr: | Version: |
| 2013-02-20 | Sofia Åström | 2012/643/9.5 | K1.0 |
| 2013-02-26 | | | |
| 2013-02-28 | Kjell Wickström | | |


# Saltvatteninträngning i Mälaren


Uppdragstagare

SMHI
601 76 Norrköping

Projektansvarig

Kjell Wickström
011-495 8311
Kjell.Wickstrom@smhi.se

Uppdragsgivare

Norrvatten
Box 2093
169 02 Solna

Kontaktperson

Per Ericsson
0705-637397
Per.Ericsson@norrvatten.se



Distribution

Klassificering

(x) Affärssekretess

Nyckelord

Volymberäkning, blandning, saltvatteninträngning

Övrigt

# Innehållsförteckning


**1 SAMMANFATTNING ..... 1**
**2 BAKGRUND OCH SYFTE ..... 2**
**3 INLEDNING ..... 2**
**4 HAVSVATTENSTÅND ..... 2**
4.1 Det globala havsvattenståndet ..... 2
4.2 Havsvattenstånd i Stockholm ..... 5
4.3 Landhöjning ..... 5
4.4 Medelvattenytans höjning ..... 6
**5 METODIK ..... 7**
5.1 Utspädning ..... 7
5.2 Volymer av bassänger i Mälaren ..... 8
5.3 Volymer saltvatten som krävs för att nå intagen ..... 10
5.4 Extrema havsvattenstånd och varaktighet ..... 10
5.4.1 Återkomsttid - Sannolikhet och risk ..... 11
5.5 Flöde över luckor ..... 11
5.6 Möjliga volymer av inträngande saltvatten ..... 12
**6 RESULTAT ..... 13**
6.1 Volymer av bassänger i Mälaren ..... 13
6.2 Volymer saltvatten som krävs för att nå intagen ..... 13
6.3 Extrema havsvattenstånd och varaktighet ..... 14
6.4 Flöde över luckor ..... 16
6.5 Möjliga volymer av inträngande saltvatten ..... 17
**7 SLUTSATSER ..... 19**
**8 DISKUSSION ..... 19**
**9 REFERENSER ..... 21**

# 1 Sammanfattning

SMHI har beräknat vilka volymer av saltvatten som krävs för att kloridhalten skall överstiga 100 mg/l vid råvattenintagen till Görväln-, Lovö-, och Norsborgsverken i östra Mälaren. Resultatet av volymberäkningarna har kombinerats med kunskap om riskerna för extrema havsvattenståndshändelser för att påvisa om denna riskbild är relevant.

De volymer av saltvatten som krävs för att nå intagen har beräknats till:

- Norsborg: 17,8549 × $10^6$ $m^3$
- Lovö: 23,1027 × $10^6$ $m^3$
- Görväln: 25,5111 × $10^6$ $m^3$

Den möjliga volym av inträngande saltvatten som ackumuleras under 100 årsperioden från 2000 till 2100 har uppskattats till 13,1676 × $10^6$ $m^3$. Denna volym bygger på att ett antal extrema händelser kommer att inträffa i tät följd och att de har en viss varaktighet. Därefter antas att det sker en utspädning då saltvattnet tar sig in i systemet. Med de antaganden som gjorts här är denna volym saltvatten inte tillräckligt stor för att nå de aktuella intagen före år 2100 utan når till Hägerstens bassäng på ett djup upptill 11,5 m och med en salthalt på ca 0,56 psu. Salthalten är alltså över den kritiska nivån på 0,1 psu men är mindre viktig i sammanhanget eftersom saltvattnet inte förväntas nå intagen före 2100.

Vi har antagit en förenklad bild och räknat med en total ackumulerad volym av saltvatten, gjort antaganden om utspädning och bortsett från diffusion. Det egentliga förloppet är att det sker ett inflöde och därefter ytterligare ett. Bassäng efter bassäng fylls gradvis upp och på dess väg späds vattnet ut med det omgivande vattnet. Utspädningen sker både genom diffusion och genom vertikal omblandning. Den faktiska blandningen/utspädningen är okänd, både den initiala och den som sker i ett senare skede. Med betydligt högre utspädning kan det salta vattnet komma att nå råvattenintagen men en så stor utspädning kan anses som osannolik. De antaganden om utspädning som gjorts i denna studie är högre än vad som visats i tidigare studier och vi vill på detta sätt vara på säkra sidan. Om saltvatteninbrotten är sällsynta hinner saltet diffundera upp mot ytan och troligen förs detta salt ut ur Mälaren eftersom flödet vanligen är riktat utåt.

# 2 Bakgrund och syfte

VAS-Rådet (Rådet för Vatten och Avloppssamverkan inom Stockholms län) i samarbete med Stockholm Länsstyrelse är intresserade av en orienterande utredning över hur stigande havsnivåer på sikt kommer att påverka dricksvattenförsörjningen till länet. SMHI har därför fått i uppdrag att analysera följande:

- Beräkna hur stora volymer inträngande saltvatten som krävs för att kloridhalten skall överstiga 100 mg/l i inkommande råvatten till Görväln-, Lovö- och Norsborgsverket i Östra Mälaren.
- Resultatet av volymberäkningarna används därefter i kombination med kunskap om riskerna för extremt höga havsvattenstånd för att resonera om riskbilden att saltvatten når intagen är relevant.

Fokus i debatten när det gäller hotbilden mot Stockholms läns dricksvattenförsörjning har förskjutits från närliggande föroreningshot (dagvatten, avloppsutsläpp, båttrafik, extremväder, kraftigt växande befolkning vilket leder till ökat föroreningstryck på Mälaren som sötvattentäkt) mot saltvattenproblematiken. Syftet med denna utredning är att få grepp om saltvatteninträngning i Mälaren är ett akut problem.

# 3 Inledning

Saltvatten kan tränga in i Mälaren om havsvattenståndet i Saltsjön blir högre än höjden på Stockholms slussar. Det finns också en risk att saltvatten skulle kunna komma in i Mälaren över land men den riskbilden analyseras inte i denna studie. Så länge slussarna är tillräckligt täta och höga bör det inte vara några risker för saltvatteninträngning. Men med stigande havsnivåer ökar risken för att saltvatten kommer in i Mälaren, om inte skyddet utökas.

Om det sker en saltvatteninträngning kommer det saltare vattnet att sjunka ner och samtidigt blandas med sötvatten och alltså spädas. Det salta vattnet är tyngre än det omgivande sötvattnet och kommer därför att sjunka till botten. Först fylls bassängen närmast Saltsjön och först när den har fyllts rinner det salta vattnet vidare in i systemet.

Norrvatten och Stockholm Vatten tar idag sitt råvatten från Mälaren vid de tre vattenverken Görväln-, Lovö- och Norsborgsverket som alla ligger i den östra delen av Mälaren, (se Figur 5.2). Norsborgsverket är det vattenverk som ligger mest kritiskt till med avseende på saltvatteninträngningsproblematiken.

Mälarens naturliga utlopp är Norrström och Söderström, norr och söder om Stadsholmen i Stockholm. Tappningen i Söderström sker numera vid Slussen under Karl Johans torg, men det mesta vattnet går via Norrström. Luckornas höjd vid både Norrström och Söderström är 96 cm relativt medelvattenytan. Slussen är under ombyggnad och luckans nya höjd antas bli tillräckligt hög för att saltvatten inte ska kunna rinna över. Endast saltvatten som kan komma att flöda över luckorna vid Norr- och Söderström beaktas i denna studie.

I denna studie används volymberäkningar och antaganden om spädningen för att göra överslagsberäkningar av vilka volymer saltvatten från Saltsjön som krävs för att ge effekt på råvattenintagen i Östra Mälaren. Volymen av inflödande saltvatten som krävs kombineras sedan med klimatscenarier över framtida extrema havsvattenstånd i Saltsjön för att göra en skattning av den volym saltvatten som kan tänkas ta sig in i Mälaren.

# 4 Havsvattenstånd

Detta stycke syftar till att beskriva kunskapsläget om havsvattenståndet globalt och i Stockholm i dagens och framtidens klimat.

## 4.1 Det globala havsvattenståndet

Havsvattenståndets variation beror av många faktorer. Globalt sett är de viktigaste den termiska expansionen (havets utvidgning vid uppvärmning) och bidrag från smältande glaciärer och de stora

landisarna på Grönland och Antarktis. Ändrade nederbördsförhållanden på dessa stora isar har också betydelse. Det finns också stora lokala skillnader, som beror på ändrade salthaltsförhållanden, ändringar i det lokala vindklimatet, ändrade gravitationsfält när de stora landisarna smälter samt ändrade landhöjnings- och landsänkningsförhållanden när belastningen på jordskorpan förändras om trycket från de stora isarna minskar. Eftersom de mest extrema vattennivåerna oftast är mest intressanta lokalt så betyder ändrad frekvens, intensitet och riktning hos stormar mycket. Ännu kvarstår en hel del frågetecken rörande framtidens havsnivåer.

I början på 1990-talet skickades flera satelliter upp vars syfte var att mäta jordytan med stor precision. Dessa mätningar visar att havsytan globalt i medeltal stigit drygt 3 mm/år under perioden 1991-2003. Detta syns även i svenska mätserier. Det finns samtidigt områden som stigit mer, eller mindre, bland annat beroende på variationer i temperatur.

Frågan om framtidens havsnivåer har blivit alltmer aktuell under de år som gått sedan IPCC presenterade sin fjärde Assessment Report (AR4) i januari 2007 (IPCC, 2007) och som utgick från den då tillgängliga klimatforskningen. AR4 angav 18-59 cm som ett intervall för höjningen av havsnivån, med regionala variationer. I bedömningen ingick effekten av havets volymexpansion orsakad av uppvärmningen och bidrag från smältande landbaserade isar. IPCC noterade att det inte fanns tillräckligt underlag för att bedöma huruvida landisarnas avsmältning skulle ytterligare accelerera i framtiden. Sedan dess har flera vetenskapliga artiklar publicerats som betonar risken för att isavsmältningen kan komma att ske snabbare och att världshavet kan komma att stiga mer än vad som tidigare antagits.

Nyare uppgifter från den internationella forskningen presenteras i Tabell 4.1. Den är baserad på de uppgifter som nått SMHI hittills och gör inte anspråk på att vara fullständig. Observera att siffrorna inte är helt jämförbara eftersom de utgår från olika referensperioder. Därför har den aktuella referensperioden angivits i tabellen. Samtliga referenser bygger på vetenskapliga studier. SMHI söker mer information om bakgrundsmaterial till olika ställningstaganden om framtida havsvattennivån, men har i dagsläget endast de publicerade rapporterna att tillgå.

Senare bedömningar av havets framtida nivåer skiljer sig från IPCC:s siffror från 2007. En del av skillnaden är dock skenbar och kan till en del bero på att uppgifterna presenteras på ett annat sätt i Assessment Report AR4 (IPCC, 2007) än i IPCC:s tredje Assessment Report (TAR) (IPCC, 2001). IPCC tolkas också ibland alltför bokstavligt utan att man tar hänsyn till att IPCC - som det uttryckligen skrivs i sammanfattningen för beslutsfattare - inte medräknat effekterna av isflöden från inlandsisarna till havet, så kallade dynamiska effekter (Naturvårdsverket, 2007).

Ytterligare en orsak är att de olika källorna använder olika sannolikhetsnivåer som ofta skiljer sig åt. Jämförelsen mellan IPCC AR4 och den holländska Deltakommitténs bedömningar diskuteras ingående av Vellinga m.fl. (2008) i ett underlagsdokument till Deltakommittén. Man betonar att det holländska arbetet fokuserar på den övre gränsen av tänkbara utvecklingar genom att använda A1F1-secnariet för framtida utsläpp. En stor skillnad ligger också i bedömningen av hur isarna på Antarktis och Grönland kommer att utvecklas. IPCC:s högsta siffra (59 cm) och det högsta värdet från UK Climate Projections science report (75,8 cm) har gemensamt att de representerar 95-percentilen, vilket i detta sammanhang alltså inte kan ses som en övre gräns (Lowe et al., 2009).

I Köpenhamns klimatanpassningsplan som kom ut på hearing i februari 2011 anges också en medelvattenhöjning på strax under 1 m som sannolik fram till 2100 (Københavns Kommune, 2011).

I en kunskapssammanställning av AMAP (Arctic Monitoring and Assessment Programme) 2011 (AMAP, 2011) behandlas bl.a. havsnivåns utveckling. Författarna bedömer att havsnivån kan stiga mellan 0,9 m och 1,6 m från 1990 till 2100 och att en stor del av höjningen beror på avsmältning från Arktiska isen. Vad gäller bidraget från värmeutvidgningen följer bedömningen IPCC:s AR4. I den svenska kunskapssammanställningen som publicerades 2011 (Rummukainen & Källén, 2009) konstateras att flera studier pekar på att landisarna bidrar till havsnivåhöjningen, om än i lägre grad än vad som bedöms i AMAP (2011). Man poängterar att betydande osäkerheter kvarstår om hur stor havsnivåhöjningen blir till år 2100, och givetvis även därefter. Studier under senare år av de landbaserade isarna visar att deras framtida bidrag gör den högre bedömningen i AR4 mer trolig än den lägre.

Världsbanken utkom med en rapport i november 2012 som skrivits av en grupp vid Potsdam Institute for Climate Impact Research and Climate Analytics (PIK), med stöd av flera vetenskapliga granskare (World Bank, 2012). Rapporten belyser riskerna med en global temperaturhöjning på 4 grader.

Rapporten sammanfattar riskerna med att en uppvärmning på 4°C sannolikt leder till en havsnivåhöjning på 0.5 till 1 meter och möjligen högre fram till 2100, samt att inom kommande århundraden kan en havsnivåhöjning med ytterligare flera metrar förverkligas.

Det är viktigt att notera att de flesta uppskattningar som förekommer rörande framtida havsnivåer bygger på något eller några av IPCC:s utsläppsscenarier. Det innebär att effekterna av eventuella utsläppsbegränsningar till följd av internationella avtal inte medräknats. Om man lyckas genomföra utsläppsbegränsningar så minskar stigningstakten, men den upphör inte helt på grund av klimatsystemets stora tröghet.

Sammantaget pekar de internationella sammanställningar och bedömningar, som SMHI tagit del av, på att ett rimligt antagande av en övre gräns för hur mycket havsytans nivå kan komma att stiga är ungefär 1 m under perioden 1990-2100, sett som ett globalt medelvärde. Utifrån detta värde och antaganden om lokala effekter, gällande att stormfrekvensen inte kommer att förändras väsentligt jämfört med det historiska klimatet, har framtida medelnivåer och extremnivåer beräknats för Stockholm.

*Tabell 4.1 Sammanställning av internationella utredningar avseende stigande havsnivå.*

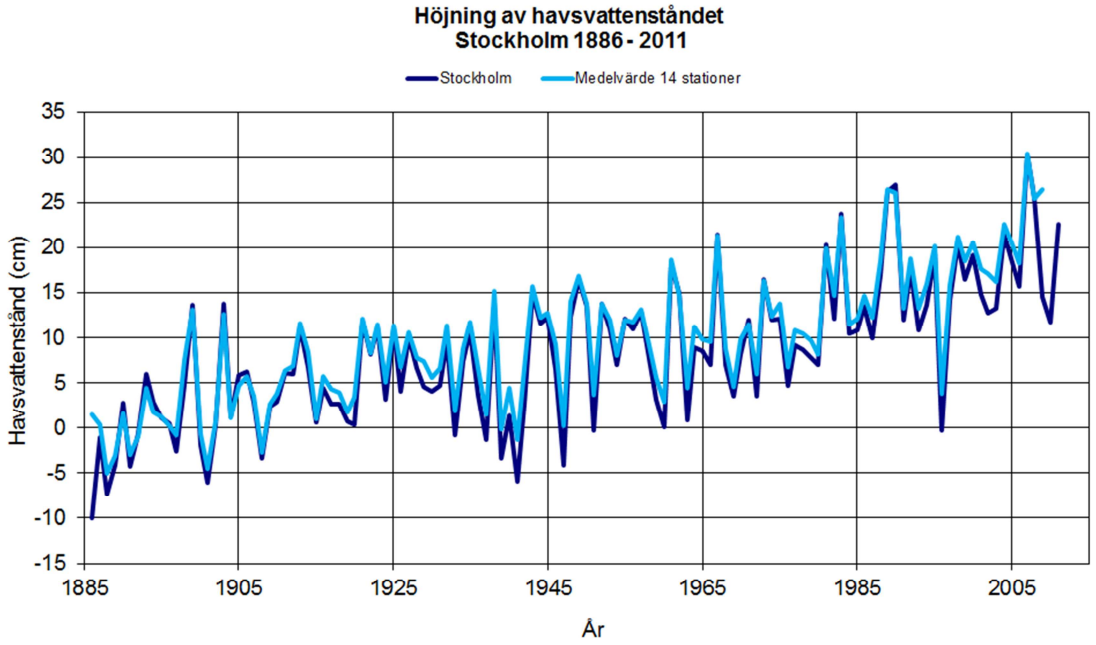
| Datum | Källa | Referensperiod | Höjning till ungefär 2100 (cm) |
|---|---|---|---|
| Januari 2007 | IPCC (2007) | 1980-1999 | 18-59 (exkl. isdynamik) |
| Hösten 2008 | Deltacommissie (2008) (Holland) | 1990 | 55-120 |
| April 2009 | Rummukainen och Källén (2009) | 2009 | ”*det kan röra sig om en meter under de närmaste 100 åren*” |
| Juni 2009 | Ministry of Natural Resources and Environment (2009), Vietnam | 1980-1999 | 75 (65-100) |
| Juni 2009 | UK Climate Projections science report (Lowe et al., 2009) | 1980-1999 | 11,6-75,8 runt Storbritannien och Irland |
| September 2009 | Direktoratet for sammfunnssikkerhet og beredskap i Norge (2009) | 2000-2100 | 80 |
| November 2009 | Copenhagen Diagnosis, (2009) | 1980-1999 | ”*at least twice as much as projected by Working Group 1 of the IPCC AR4*”, “*it may well exceed 1 m*” |
| November 2009 | NOAA, 2009 | ”by the end of this century” | 3-4 fot (90-120 cm) |
| November 2009 | Netherlands Environmental Assessment Agency PBL et al. (2009) | 1990-2100 | 55-110 (45-105 lokalt för Holland) |
| Februari 2010 | Australian Department of Climate Change, (2010) | 1990-2100 | 110 |
| Februari 2011 | Köpenhamns klimatanpassningsplan (Københavns Kommune, 2011) | 2010-2110 | 100 |
| 2011 | SWIPA 2011 Assessment (AMAP, 2011) | 1990-2100 | 90-160 |
| November 2012 | Turn Down the Heat (World Bank, 2012) | | “0.5 to 1 m and possibly more” |

## 4.2 Havsvattenstånd i Stockholm

Mätningar av havsvattenstånd startade i Stockholm redan 1776 vilket gör den till en av världens längsta vattenståndsserier. Timvis registrering av vattenståndet startade 1886 på Skeppsholmen i Stockholm.

Vid eller nära många av SMHIs havspeglar finns GPS-stationer för mätning av absolut landhöjning, bland annat i Stockholm. Samlokalisering av mätstationerna gör att såväl den globala havsnivåhöjningen som den lokala landhöjningen kan följas med stor noggrannhet.

Analyser av långa tidsserier av havsvattenstånd visar att havet stigit i Stockholm och i Sverige. Figur 4.1 visar årsmedelvärdet av havsvattenstånd i Stockholm och på 14 stationer i Sverige 1886-2011. I figuren är effekten från landhöjningen borttagen, och man kan se att medelvärdet varje enskilt år varierar, samtidigt som även en stigande trend är väl synlig. En dataanalys visar att höjningen i Sverige varit ungefär 1,5 mm/år i denna period (Hammarklint, 2011). Sedan 1980 har den varit ungefär 3 mm/år. Satellitobservationer visar på en global höjning av vattenståndet på ca 3 mm/år från 1993-2005, och en något lägre höjning efter 2005 på 2,5 mm/år.

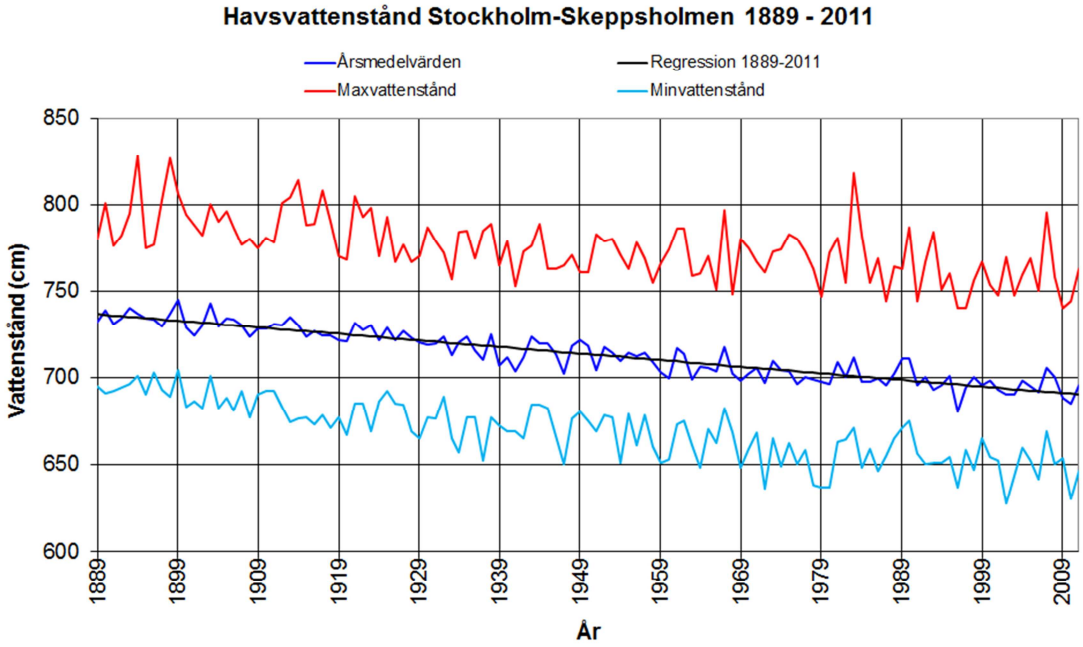



*Figur 4.1 Havsvattenstånd (årsmedelvärde) från Stockholm och Sverige 1886-2011 när landhöjningen är borttagen. Det är stora variationer mellan åren, men även en tydlig stigande trend.*

## 4.3 Landhöjning

I Sverige pågår en landhöjning som är störst i norra Sverige och avtar successivt söderut. I dagligt tal förväxlas ofta landhöjningen med den synbara landhöjningen som är en relation mellan havets höjning och landets höjning/sänkning. I och med den kraftiga landhöjningen i norra Sverige tar det längre tid där innan effekterna av den globala vattenståndsökningen märks. I områden där landhöjningen är liten höjs vattenståndet relativt land (en synbar landsänkning).

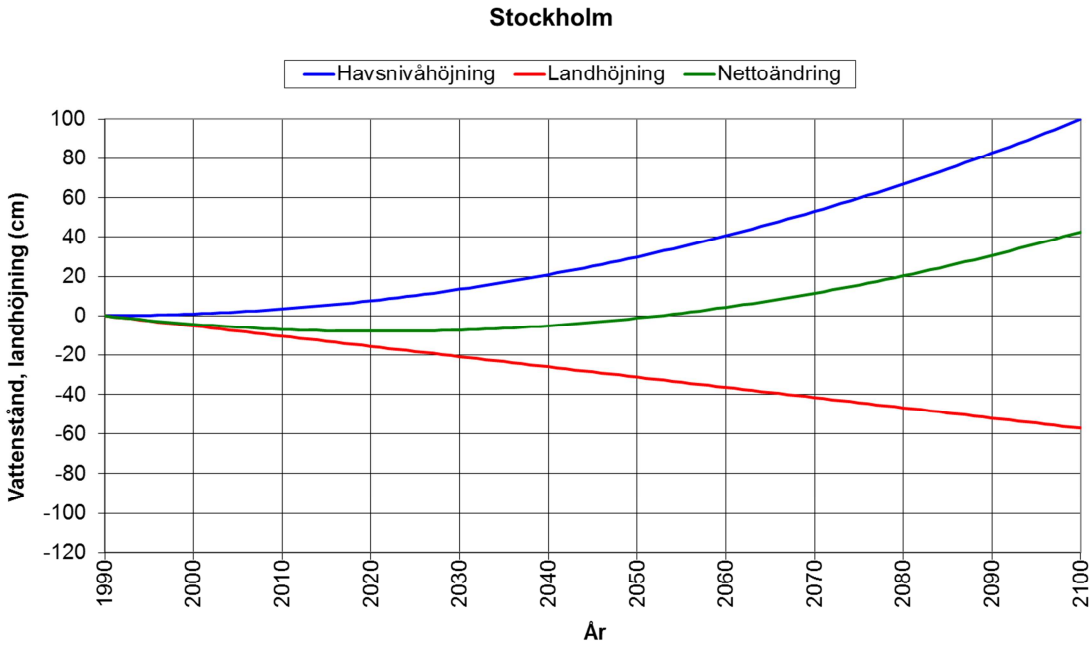
I Stockholm är landhöjningen 5,2 mm/år. Då värdet är högre än havens stigningstakt idag har vi nu en synbar landhöjning i Stockholm. Figur 4.2 visar medelvattenstånd och årets högsta och lägsta vattenstånd i ett lokalt fast höjdsystem för Stockholm 1886-2011. I kurvan för årsmedelvärdet ser man den synbara landhöjningen genom att årsmedelvärdet sjunker. Den synbara landhöjningen kommer att fortsätta till dess att medelvattenståndets höjningstakt överskrider landhöjningen.




*Figur 4.2 Vattenståndet i Stockholm är kombinationen av landhöjning, havshöjning och variationer som beror på väderförhållanden. Den mörkblå linjen visar Stockholms medelvattenstånd, och trendlinjen visar tydligt att landhöjningens bidrag är större än havshöjningen från 1889 till 2011. Den röda och ljusblåa linjen visar årets högsta respektive årets lägsta vattenstånd, vilka har stora år- till år-variationer.*

## 4.4 Medelvattenytans höjning

Medelvattenytans höjning blir synbar först då dess höjningstakt överskrider landhöjningen. Figur 4.3 visar medelvattenytans utveckling 1990-2100 förutsatt att den globala havshöjningen är +30 cm fram till 2050 och + 1 m fram till 2100. För Stockholms del blir det ingen nettohöjning jämfört med 1990 före 2050, men jämfört med 2012 höjs medelvattenytan något fram till 2050. År 2100 har medelvattenytan höjts ca 40 cm.




*Figur 4.3 Medelvattenståndets utveckling (grön linje) vid Stockholm-Skeppsholmen förutsatt en global havshöjning på 1 m 1990-2100 (blå linje) varav 30 cm av höjningen sker 1990-2050. Landhöjningen visas som en röd linje och kompenserar för havshöjningen fram till 2050 då havet stiger över den nivå som var 1990.*

# 5 Metodik

För att kunna beräkna vilka volymer saltvatten från Saltsjön som krävs för att ge effekt på de aktuella råvattenintagen behövs det ett antagande om utspädningen av det inträngande saltvattnet på dess väg in i systemet. Dessutom behöver volymerna av bassängerna i Mälaren fram till råvattenintagen beräknas. Volymerna av bassängerna i Mälaren används alltså i kombination med antaganden om utspädningen för att beräkna vilka volymer av saltvatten som krävs för att nå intagen.

För att kunna resonera om risken att saltvatten når råvattenintagen används resultaten från volymberäkningarna och antagandena om utspädningen i kombination med extrema havsvattenstånd, för dagens och framtidens klimat. Hur ofta ett extremt havsvattenstånd kan förväntas inträffa samt hur länge det varar är viktiga parametrar för att kunna beräkna hur stor volym av saltvatten som kan ackumuleras under en tidsperiod. I denna studie beräknas den totala volymen saltvatten som kan tänkas ackumuleras under 100 årsperioden 2000-2100. Även flödet, med vilket saltvattnet rinner över luckorna vid Norrström och Söderström vid ett högt havsvattenstånd, är en viktig parameter för att kunna bestämma volymen av saltvatten som möjligen kan tränga in och beräknas här med hjälp av en modell.

## 5.1 Utspädning

När saltare vatten strömmar in i en bassäng med lägre salthalt/densitet sjunker det tyngre vattnet till botten och tränger undan det gamla bottenvattnet. Samtidigt sker en utspädning av det inflödande vattnet med omkringliggande vatten. Utspädningen beror bland annat på hastigheten med vilken det saltare vattnet strömmar in. Det inflödande vattnet måste fylla varje bassäng lokalt innan saltvatten kan rinna vidare in i systemet, se Figur 5.1.

Eftersom det inträngande vattnet är tyngre (på grund av den högre salthalten) sjunker det ner mot bassängens botten. Inflödet skapar en gravitationsdriven turbulent bottenström som kan orsaka blandning med omgivande vatten (Arneborg et al 2004).

Ett inflöde av saltvatten i Mälaren kan liknas vid ett inflöde av tungt salt vatten till en tröskelfjord eller Östersjön.

I *Kõuts och Omstedt (1993)* studerades djupvattenutbyte och blandningsprocesser i Egentliga Östersjön utifrån temperatur- och salthalts-data från en period om 20 år. Man fann att det inflödande tunga vattnet ”förorenades” av ytvatten och ökade med en faktor 4 från Kattegatt till Landsortsdjupet (nordväst om Gotland) . Tre huvudsakliga blandningszoner identifierades, vilka är;

- Bälten och Öresund - inflödet av djupvatten ökade med 79 %
- Arkona bassängen (söder om Skåne), där vertikal omblandning orsakar en ökning av den inflödande djupvattenvolymen med ca 53 %.
- Stolpe kanalen, där den turbulenta omblandningen utökar djupvattnet med ca 28 %.

*Arneborg m.fl. (2004)* studerade graden av inflöde och blandning under en djupvattenförnyelse i Gullmarfjorden i Bohuslän. Baserat på vattnets egenskaper, såsom temperatur, salthalt och syrgaskoncentration, indikerar deras resultat att volymflödet av nytt vatten ökar med ca 33 % på väg nedåt på grund av inblandning av gammalt bassängvatten. Som mest innehåller det nya vattnet 40 % gammalt bassängvatten och 60 % kustvatten, vilket kan ses som ett absolut maximum innehåll av gammalt vatten och möjligen endast för det vatten som tränger in under första dagen.

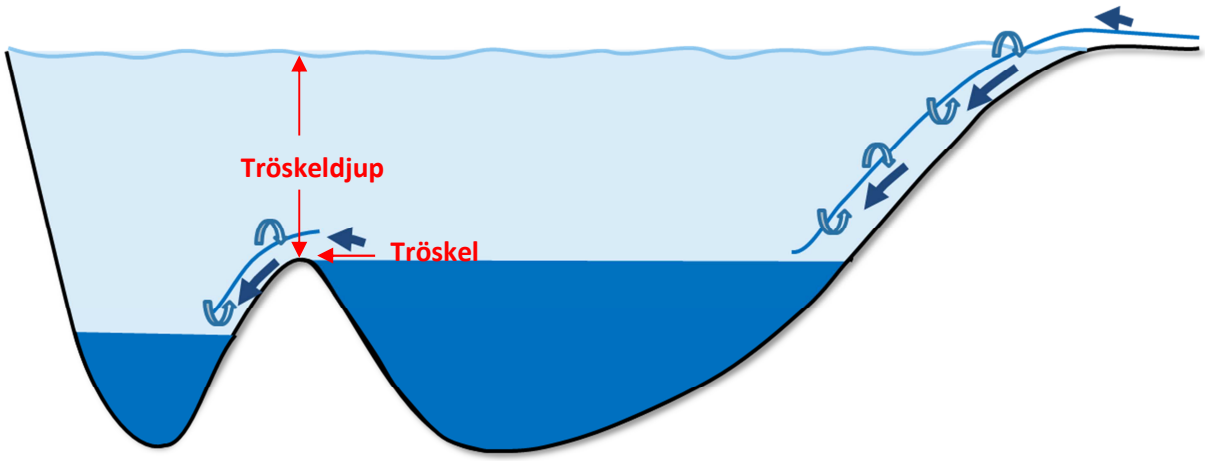
Utifrån dessa studier görs två antagande om utspädningen, vilka är:

1. Initialutspädningen - dvs. den utspädning som sker då vattnet rinner över luckorna vid Norrström och Söderström. Blandningsförhållandet vid initialspädningen antas vara turbulent och en full spädning (1-1) har antagits, dvs. volymflödet ökar med 100 % alltså en fördubbling, på grund av inblandning av sötvatten.
2. Utspädning vid transport över trösklar. Denna utspädning antas vara mindre turbulent än initialutspädningen och antas här vara 80 %. Volymflödet av saltvatten ökar alltså med 80 % på grund av inblandning av sött vatten då det passerar trösklar.

Dessa antaganden om utspädning är högre än vad tidigare nämnda studier visat men med en stor inblandning av sött vatten ökar volymen och vi vill på detta sätt vara på säkra sidan.

Samtidigt som volymen av det inträngande vattnet ökar vid utspädningen minskar salthalten. Utifrån mätningar av salthalten vid Blockhusudde antas det inströmmande havsvattnet ha en salthalt på 2 psu och det inblandande vattnet från Mälaren antas vara sött.

Genom att anta en initialutspädning på 100 % och därefter till 80 % vid tröskelpassager kommer salthalten på det inträngande utspädda vattnet minska betydligt. Den kritiska salthalten för vattenverken är 100 mg/l vilket motsvarar 0,1 psu.




*Figur 5.1 Principskiss av processen då saltare vatten strömmar in i en bassäng med lägre salthalt/densitet, fyller första bassängen och rinner vidare till nästa bassäng.*

## 5.2 Volymer av bassänger i Mälaren

Det inflödande salta vattnet måste fylla varje bassäng lokalt innan vattnet kan rinna vidare över tröskeln in till nästa bassäng. Volymerna för de olika bassängerna fram till råvattenintagen beräknas med hjälp av ArcGIS 10.1 och programspråket Python. I närområdet (ca 0-3 km) till Slussen fram till Klubbensborg, där djupdata är högupplöst, är volymberäkningarna mycket noggranna.

Djupdata som använts som underlag är följande:

- Data från digitala sjökort Nr 111 och Nr 6141.
- Interpolerad punktdata med upplösningen 2×2 m respektive 5×5m för närområdet till Slussen fram till Klubbensborg, från Slussenprojektet.
- Punktdata från Sjöfartsverket från 3 känsliga och trånga partier (Område I-III i Figur 5.2). Data tillhandahölls av Sjöfartsverket.

Djupdatan har bearbetats och sammanfogats till en kontinuerlig djupmodell. Kartprojektionen som använts är SWEREF99 TM.

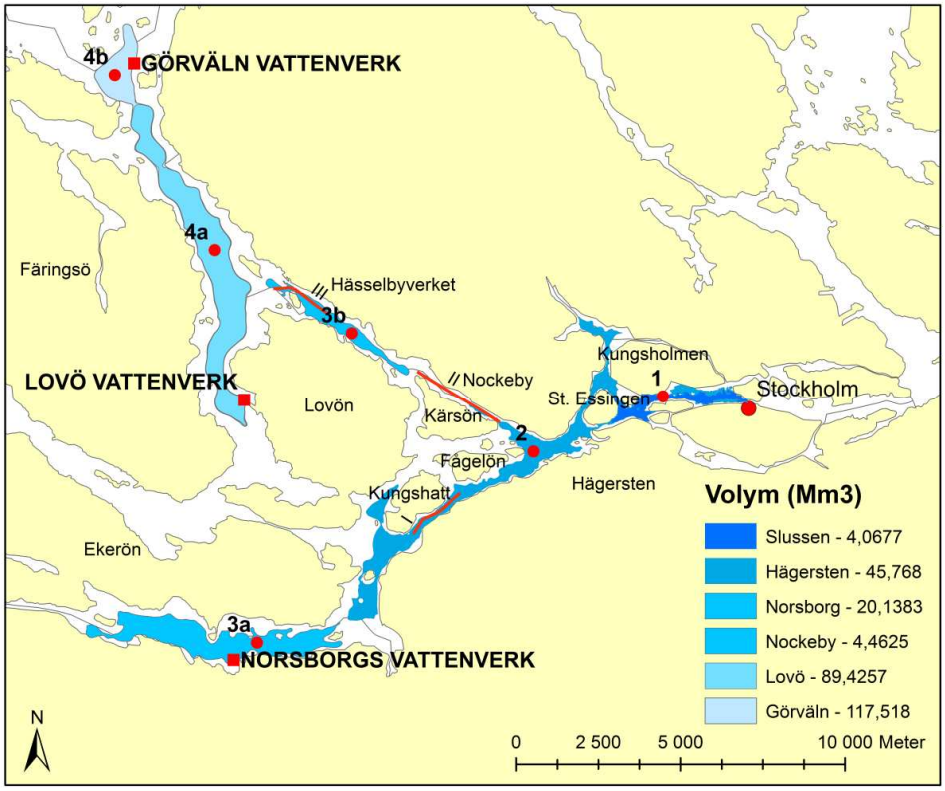
Volymer för olika bassänger har räknats upp till intagsdjupen eller tröskeldjupen. Då det förekommer flera intagsdjup för de aktuella vattenverken har de intagsdjup som ligger djupast använts. De intagsdjup som använts vid volymberäkningarna listas i Tabell 5.1.

De bassänger som saltvattnet måste fylla på sin väg in i systemet är; 1 - Slussen, 2 - Hägersten, 3a - Norsborg, 3b - Nockeby, 4a - Lovö och 4b - Görväln. För att saltvattnet skall kunna nå Norsborgs vattenverk krävs det att bassäng 1, 2 och 3a fylls. För att saltvattnet skall kunna nå Lovöns respektive Görvälns vattenverk krävs det att bassäng 1, 2, 3b och 4a respektive 4b fylls. Se Figur 5.2.

Tekniken som använts vid volymberäkningarna är att räkna ut volymen från botten och uppåt med ett intervall på 0,5-1 m. Vid bestämning av tröskeldjup har dessa stegvis beräknade volymer använts genom att jämföra volymer för två intilliggande intervall. Då volymen ökar mycket mellan två intervall har den volym valts som beräknats för det större djupet. Som exempel, vid Nockeby beräknades volymen under 11 m till ca $4{,}5 \times 10^6$ $m^3$ och volymen under 10.5 m beräknades till ca $361 \times 10^6$ $m^3$, alltså valdes den mindre volymen. En stor skillnad på volymer beräknade för två intilliggande djup visar att vattnet har runnit över tröskeln och in i nästa bassäng. På detta sätt överskattas inte heller volymen.

*Tabell 5.1 Intagsdjup vid vattenverken som använts vid volymberäkningarna av bassängerna.*

| Vattenverk | Intagsdjup |
|---|---|
| Norsborg | 11 m |
| Lovö | 23 m |
| Görväln | 22 m |




*Figur 5.2 Översiktskarta med vattenverken (röd fyrkant), delbassänger 1-4, samt partier där mer utförlig djupdata beställts från Sjöfartsverket, I-III.*

## 5.3 Volymer saltvatten som krävs för att nå intagen

När antaganden om utspädningen gjorts och volymerna av bassängerna i Mälaren beräknats kan de volymer av saltvatten som krävs för att nå de tre aktuella intagen beräknas.

Det inträngande saltvattnet måste först passera luckorna vid Norr- och Söderström. För att sedan nå Norsborgs vattenverk måste därefter två tröskelpartier passeras och för att nå Görvälns- och Lovöns vattenverk måste tre tröskelpartier passeras. Initialutspädningen har antagits vara 100 % och vid tröskelpartier har utspädningen antagits vara 80 %.

Exempelvis för Norsborgs vattenverk har den volym saltvatten som krävs för att nå intaget beräknats enligt:

$$V_{in} = \frac{V_{Norsborg}}{1.8 \times 1.8 \times 2} + \frac{V_{Hägersten}}{1.8 \times 2} + \frac{V_{Slussen}}{2} \quad (1)$$

Volymerna saltvatten som krävs för att nå intagen vid Lovön respektive Görväln beräknas på liknande sätt.

## 5.4 Extrema havsvattenstånd och varaktighet

Hur ofta ett extremt havsvattenstånd kan förväntas inträffa samt hur länge det varar är viktiga parametrar för att kunna beräkna hur stor volym av saltvatten som kan ackumuleras under en tidsperiod. Havsvattenståndet måste vara så pass extremt att det är högre än luckornas höjd (96 cm relativt medelvattenytan) vid Norrström och Söderström.

För beräkning av extrema havsvattenstånd i dagens klimat har statistiska återkomsttider beräknats utifrån årshögsta vattenstånd med hjälp av havsvattenståndsdata från Stockholm-Skeppsholmen.

För beräkningen av extrema havsvattenstånd i framtida klimat adderas medelvattenytans höjning samt korrektion för landhöjning innan den statistiska beräkningen görs för framtidens klimat. Metodiken bygger på ett antagande om att fördelningen av extrema vattenstånd är densamma som idag och att hela höjningen av vattenståndet beror på medelvattenytans höjning. De senaste forskningsresultaten från Rossby Centre/ENSEMBLES-projektet visar ingen tendens att stormar varken blir vanligare eller mer ovanliga och stödjer därmed denna ståndpunkt.

Antalet extrema havsvattenstånd som kan generera ett saltvatteninflöde och som förväntas inträffa under 100 årsperioden 2000-2100 bestäms utifrån dess återkomsttid. När dessa extremer faktiskt inträffar kan ej förutses. Eftersom det inte förväntas bli någon nettohöjning av medelvattenytan före år 2050 i Stockholm bestäms antalet extrema havsvattenstånd som förväntas inträffa fram till dess utav återkomsttiderna beräknade för dagens klimat. Den ackumulerade volymen av inträngande saltvatten för perioden 2000-2050 representeras här utav de tillfällen då havsvattenståndet har varit högre än luckornas höjd historiskt sett. Efter 2050 fram till 2100 bestäms antalet extrema havsvattenstånd som kan förväntas inträffa utav återkomsttiderna beräknade för framtidens klimat (2100). Tillsammans ger de ett mått på antalet extrema havsvattenstånd som kan förväntas inträffa fram till 2100.

Förutsatt att nivån för en viss återkomsttid är högre än luckornas höjd tas de med i beräkningarna. Exempelvis så inträffar eller överträffas ett havsvattenstånd med en återkomsttid på 50 år i genomsnitt en gång under en period på 50 år. Ett havsvattenstånd med en återkomsttid på 10 år inträffar eller överträffas i genomsnitt 5 gånger på 50 år. Om en nivå med 50 års återkomsttid inträffar, överträffas samtidigt den nivån med en återkomsttid på 10 år. Därtill antas även att en havsnivå med en återkomsttid på 100 år inträffar under respektive 50 årsperiod, för att vara på säkra sidan.

Genom att analysera havsvattenståndsdata från Stockholm-Skeppsholmen utifrån de tillfällen då havsvattenståndet varit högre än luckornas höjd, fås ett mått på hur länge ett extremt havsvattenstånd varar. Hur länge havsvattenståndet varit högre än luckorna, dvs. dess varaktighet, har bestämts i antal timmar. Varaktigheten av framtida extrema havsvattenstånd antas vara samma som den längsta uppmätta historiskt sett.

Höjningen av havsvattenståndet är en dynamisk process som sker stegvis fram till att det når dess maximum, för att sedan klinga av. Havsvattenståndsextremer har relativt kort varaktighet och den maximala nivån under ett höjningsförlopp varar ofta bara någon timme. Den maximala nivån har använts vid beräkning av vilka volymer som genererats vid de tillfällen då havsnivån varit högre än luckornas höjd.

### 5.4.1 Återkomsttid - Sannolikhet och risk

Som mått på översvämningsrisker används vanligen begreppet återkomsttid, vilket betecknar den genomsnittliga tiden mellan två översvämningar av samma omfattning. Ett vattenstånd med en återkomsttid på 100 år uppnås eller överträffas i genomsnitt en gång på 100 år vilket innebär att sannolikheten är 1 på 100 för varje enskilt år. Uttrycket beskriver alltså en procentuell sannolikhet för att en händelse inträffar varje enskilt år. En händelse med en återkomsttid på 100 år beskriver att händelsen har 1 % sannolikhet att inträffa varje enskilt år. En återkomsttid på 50 år motsvarar en sannolikhet på 1/50 eller 2 % varje enskilt år. Eftersom man exponerar sig för risken under flera år blir den ackumulerade sannolikheten avsevärt större. Tabell 5.2 visar den sammanlagda sannolikheten för att en händelse med en viss återkomsttid skall överskridas under en längre tidsperiod. Ett vattenstånd med återkomsttiden 100 år har t.ex. 5 % sannolikhet att inträffa under 5 år, 39 % sannolikhet att inträffa under en 50-årsperiod och en sannolikhet på 63 % att inträffa under en 100 årsperiod. Risken är alltså större att 100-årsvärdet överskrids än underskrids under en period på 100 år.

*Tabell 5.2 Sannolikheten för ett visst vattenstånd uttryckt i procent under en period av år.*

| Återkomst-tid (år) | Sannolikhet under 5 år (%) | Sannolikhet under 10 år (%) | Sannolikhet under 20 år (%) | Sannolikhet under 50 år (%) | Sannolikhet under 100 år (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| 2 | 97 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 5 | 67 | 89 | 99 | 100 | 100 |
| 10 | 41 | 65 | 88 | 99 | 100 |
| 25 | 18 | 34 | 56 | 87 | 98 |
| 50 | 10 | 18 | 33 | 64 | 87 |
| 100 | 5 | 10 | 18 | 39 | 63 |

## 5.5 Flöde över luckor

En annan viktig parameter för att kunna beräkna volymen av saltvatten som möjligen kan tränga in är flödet med vilket saltvattnet rinner över luckorna vid Norrström och Söderström vid ett högt havsvattenstånd (högre än luckorna).

Flödet beräknas här med den hydrauliska modellen HEC-RAS. Modellen har satts upp för hela området från Saltsjön och förbi slussarna vid Norr- och Söderström. HEC-RAS är en 1-dimensionell modell som simulerar hydrauliken av vattenflödet genom floder eller kanaler.

Flödet över luckorna har beräknats för havsvattenstånd upp till 2 m över medelvattenytan. Luckornas höjd är 96 cm relativt medelvattenytan och som nivå på Mälaren har dess medelvattenstånd använts, 74 cm relativt havets medelvattenyta.

## 5.6 Möjliga volymer av inträngande saltvatten

För att kunna resonera kring risken om saltvatten når vattenintagen används återkomsttiderna av extrema havsvattenstånd över luckornas höjd för dagens och framtidens klimat tillsammans med uppskattning om dess varaktighet. Även de beräknade flödena med vilket saltvattnet rinner över luckorna vid ett högt vattenstånd behövs vid bestämningen av möjliga volymer av inträngande saltvatten. Den möjliga volym av inträngande saltvatten har här bestämts som den volym som ackumuleras under 100 årsperioden från 2000 till 2100. Denna totala volym baseras alltså på ett antal extrema havsvattenstånd med en viss varaktighet och som rinner in med ett visst flöde.

När den möjliga volymen av inträngande saltvatten uppskattats används antagandena om utspädningen som sker dels initialt över luckorna och sedan vid tröskelpassager för att se hur långt in i systemet denna volym når. Att saltet diffunderar under tiden mellan två saltvatteninbrott bortses ifrån.

Vi tittar alltså på en sammanlagd volym saltvatten som initialt späds ut när det rinner över luckorna vid Norr- och Söderström. Enligt antaganden om initialutspädningen sker alltså en fördubbling av volymen i detta skede. Samtidigt som volymen fördubblas halveras salthalten. När bassängen närmast Saltsjön fyllts rinner det nu utspädda saltvattnet vidare in i systemet och för varje tröskelpassage späds det ytterligare enligt antagandet om utspädningen över trösklar i stycke 5.1.

Hur långt denna sammanlagda volym saltvatten når räknas ut enligt följande princip:

$$\begin{aligned} V_1 &= V_{in} \times 2 \\ V_2 &= (V_1 - V_{Slussen}) \times 1.8 \\ V_3 &= (V_2 - V_{Hägersten}) \times 1.8 \end{aligned} \qquad (2)$$

Volym $V_3$ är alltså den volym som tar sig in i Norsborgs och Nockebys bassänger om den är tillräckligt stor. Ifall volymen inte är tillräckligt stor får man en negativ volym (antingen $V_2$ eller $V_3$) och fortsatta beräkningar är ej nödvändiga. För att vattnet skall kunna nå Lovöns eller Görvälns vattenverk krävs det att saltvattnet fyller även Nockebys bassäng för att kunna rinna vidare.

# 6 Resultat

## 6.1 Volymer av bassänger i Mälaren

Figur 5.2 visar en översikt av bassängvolymernas utbredning beräknade från botten och upp till tröskeldjupen/intagsdjupen. Bassängerna är namngivna och numrerade enligt; 1- Slussen, 2 - Hägersten, 3a - Norsborg, 3b - Nockeby, 4a - Lovö och 4b - Görväln. Bassängernas volymer listas i Tabell 6.1. Volymen för bassäng Görväln innefattar även volymen för bassängen Lovö.

Volymen fram till Norsborgs vattenverk består av volymerna för bassängerna Slussen, Hägersten och Norsborg. För Lovö vattenverk beräknas den totala volymen fram till intaget av volymerna för bassängerna Slussen, Hägersten, Nockeby och Lovö. Och för Görvälns vattenverk bestäms den totala volymen utav volymerna för bassängerna Slussen, Hägersten, Nockeby och Görväln. De totala volymerna fram till intagsdjupen för de respektive vattenverken listas i Tabell 6.2.

*Tabell 6.1 Beräknade volymer av delbassänger fram till vattenverken och upp till intagsdjupen/tröskeldjupen.*

| Bassäng | Beräkningsdjup (m) | Volym under beräkningsdjupet ($m^3 \times 10^6$) |
|---|---|---|
| 1 - Slussen | 15 m | 4,0677 |
| 2 - Hägersten | 11 m | 45,768 |
| 3a - Norsborg | 11 m | 20,1383 |
| 3b - Nockeby | 11 m | 4,4625 |
| 4a - Lovö | 23 m | 89,4257 |
| 4b - Görväln | 22m | 117,518 |

*Tabell 6.2 De totala volymerna fram till intagsdjupen för de respektive vattenverken.*

| Vattenverk | Volym ($m^3 \times 10^6$) |
|---|---|
| Norsborg | 69,974 |
| Lovö | 143,7239 |
| Görväln | 171,8162 |

## 6.2 Volymer saltvatten som krävs för att nå intagen

Volymen av saltvatten som krävs för att nå de aktuella intagen beräknas utifrån volymerna fram till vattenverken enligt Tabell 6.2, volymerna av delbassängerna i Tabell 6.1 och ekvation 1 i Stycke 5.3 som innefattar antagandena om utspädningen.

De beräknade volymerna av saltvatten som krävs för att nå till de aktuella vattenverken listas i Tabell 6.3. Den volym saltvatten som krävs för att nå till vattenverket vid Norsborg är beräknad till 17,8549 × $10^6$ $m^3/s$. För vattenverken vid Lovön respektive Görväln krävs det något större volymer saltvatten för att läget skall bli kritiskt, nämligen 23,1027 × $10^6$ $m^3/s$ respektive 25,5111× $10^6$ $m^3/s$.

*Tabell 6.3 Volymer av saltvatten som krävs för att nå intagen för de tre vattenverken vid Norsborg, Lovön och Görväln.*

| Vattenverk | Volym saltvatten ($m^3 \times 10^6$) |
|---|---|
| Norsborg | 17,8549 |
| Lovön | 23,1027 |
| Görväln | 25,5111 |

## 6.3 Extrema havsvattenstånd och varaktighet

De statistiskt beräknade havsnivåerna för återkomsttider upp till 100 år listas i Tabell 6.4. För 2012 är havsvattenståndet med 100 års återkomsttid 105 cm och 150 cm för 2100. Ett vattenstånd med återkomsttiden 2 år i framtida klimat (2100) motsvarar ungefär ett vattenstånd med en återkomsttid på 75 år i dagens klimat. Det blir alltså vanligare med havsvattenstånd över luckornas höjd i ett framtida klimat. I dagens klimat är det havsvattenstånd med en återkomsttid på 50 år eller större som är högre än luckornas höjd. Nivåerna anges relativt medelvattenytan.

Havsvattenståndet har varit högre än luckornas höjd vid Norrström och Söderström vid tre tillfällen sedan 1886. Dessa tillfällen visas i Figur 6.1 och är de tre högsta uppmätta vattenstånden i Stockholm. Två av dessa inträffade i januari och februari 1983 och det tredje högsta i januari 2007. Havsvattenståndet uppmättes för dessa tillfällen till 107, 111 respektive 104 cm över medelvattenytan. De två högsta havsvattenstånden når nivåer som har en återkomsttid på över 100 år och inträffade inom loppet av två månader. Detta är ett bra exempel på att en nivå med en relativt lång återkomsttid faktiskt förekommer och att det kan inträffa med ett kort tidsintervall. Dessa tre tillfällen får här representera den ackumulerade volymen av inträngande saltvatten för perioden 2000-2050.

Gemensamt för alla tre är att vattenståndet innan extremvärdet är mycket högt, upp mot 60 cm. Vintern 2006-2007 är ett exempel på betydelsen av förhöjda medelvattennivåer. Ihållande västvindar ledde till mycket högre vattenstånd än normalt i Östersjön och flera extrema vattenstånd uppmättes då i hela Östersjön. Själva svängningen från utgångsläget är inte mer än ca 60 cm. Det är alltså kombinationen av något som sker under längre tid som höjer medelvattenståndet och en extrem händelse som ger de riktigt höga vattenstånden.

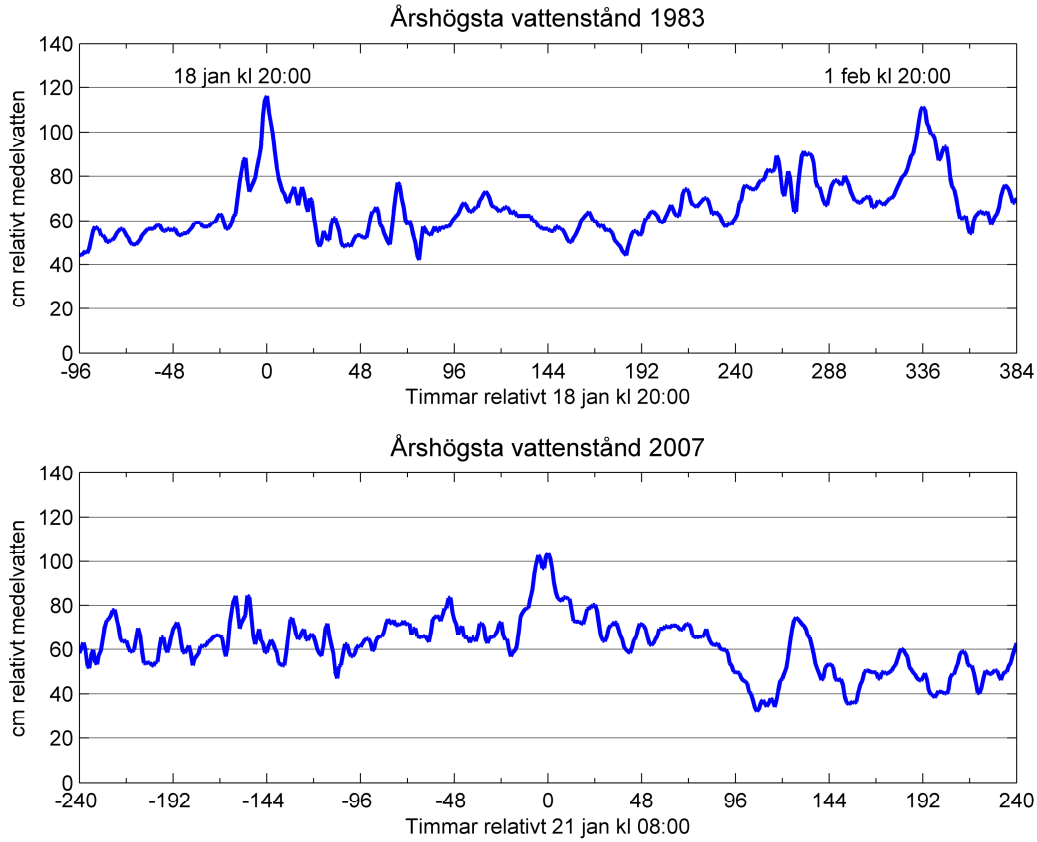
I Tabell 6.5 listas varaktigheten, medel, minimum och maximum av havsvattenståndet vid de tre tillfällen då havsvattenståndet varit högre än luckornas höjd. Nivåerna anges relativt medelvattenytan.

*Tabell 6.4 Vattenstånd med 2, 5, 10, 25, 50 samt 100 års återkomsttid relativt medelvattenytan (MW). Intervallerna visar 90 % konfidensintervall, och värdena för 2100 bygger på +1 m global höjning av vattenytan och reduktion för landhöjning.*

| Återkomsttid (År) | Vattenstånd rel. MW (cm) 2012 | Vattenstånd rel. MW (cm) 2100 |
|---|---|---|
| 2 | 60<br>57-62 | 102<br>100-105 |
| 5 | 72<br>70-76 | 115<br>112-118 |
| 10 | 81<br>77-85 | 123<br>120-128 |
| 25 | 91<br>86-99 | 133<br>128-142 |
| 50 | 98<br>91-110 | 141<br>134-152 |
| 100 | 105<br>96-121 | 148<br>139-164 |

*Tabell 6.5 Start- och stopptid, varaktighet, medel, minimum och maximum av havsvattenståndet relativt medelvattenytan vid de tre högsta uppmätta tillfällena vid Stockholm-Skeppsholmen sedan 1886 relativt luckornas höjd om 96 cm relativt medelvattenytan.*

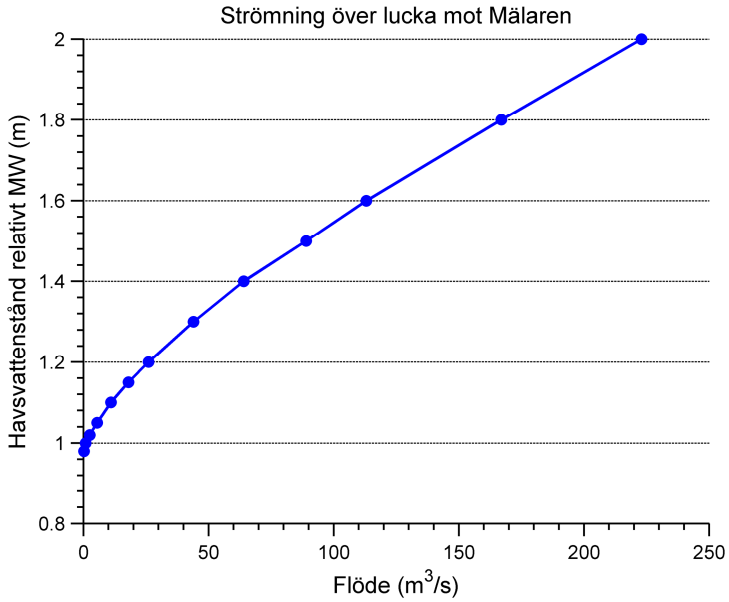
| Starttid | Stopptid | Varaktighet (h) | Medel Vst (cm) | Min Vst (cm) | Max Vst (cm) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1983-01-18 kl. 18:00 | 1983-01-18 kl. 23:00 | 5 | 108 | 99 | 116 |
| 1983-02-01 kl. 17:00 | 1983-02-02 kl. 02:00 | 9 | 104 | 97 | 111 |
| 2007-01-21 kl. 02:00 | 2007-01-21 kl. 10:00 | 8 | 100 | 97 | 104 |




*Figur 6.1 De tre högsta uppmätta vattenstånden i Stockholm, 117, 111 och 104 cm över medelvatten. Vattenståndsextremerna har relativt kort varaktighet, de högsta nivåerna förekommer under ca 6-12 timmar. Hela förloppet från utgångsläget och tillbaka till samma nivå tar ungefär 48 timmar i de tre fall som visas här.*

## 6.4 Flöde över luckor

De beräknade flödena över luckorna vid Norrström och Söderström visas som funktion av havsvattenståndet i Figur 6.2 och listas i Tabell 6.6.




*Figur 6.2 Beräknat flöde över luckorna vid Norrström och Söderström som funktion av havsvattenståndet relativt medelvattenytan. Luckornas höjd är 0.96 m relativt medelvattenytan.*

*Tabell 6.6 Beräknat flöde över luckorna vid Norrström och Söderström för havsvattenstånd från 1,0-2,0 m relativt medelvattenytan. Luckornas höjd är 0,96 cm relativt medelvattenytan.*

| Vattenstånd rel. MW (m) | 1,0 | 1,1 | 1,2 | 1,3 | 1,4 | 1,5 | 1,6 | 1,7 | 1,8 | 1,9 | 2,0 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Flöde ($m^3/s$) | 0,9 | 11 | 26 | 44 | 64 | 89 | 113 | 140 | 167 | 195 | 223 |

## 6.5 Möjliga volymer av inträngande saltvatten

Den totala ackumulerade volymen inträngande saltvatten bestäms utifrån resultaten utav hur vanligt förekommande ett extremt havsvattenstånd över luckornas höjd vid Norrström och Söderström är och kan tänkas bli i framtiden, dess varaktighet samt det beräknade flödet. De framtida extrema havsvattenståndens varaktighet har bestämts utifrån den längsta uppmätta varaktigheten historiskt sett, alltså 9 h och flödet ges från resultaten från den hydrauliska modellen.

För perioden fram till 2050 används återkomsttider beräknade för dagens klimat och representeras här utav de tre tillfällen då havsvattenståndet har varit högre än luckornas höjd historiskt sett. Volymerna från dessa tre tillfällen listas i Tabell 6.7 tillsammans med dess varaktighet, flöde och nivå.

För perioden från 2050 till 2100 används återkomsttider beräknade för framtidens klimat (2100). Antalet extrema händelser, vilken nivå, flöde och vilka volymer av inträngande saltvatten de generar är listat i Tabell 6.8.

Den totala volymen för perioden 2000-2050 är alltså $0{,}8388 \times 10^6$ $m^3$och för nästföljande 50-årsperiod (2050-2100) är den totala volymen $12{,}3288 \times 10^6$ $m^3$, vilket ger den sammanlagda volymen $13{,}1676 \times 10^6$ $m^3$ för 100-årsperioden 2000-2100. Denna volym är mindre än den volym saltvatten som beräknats krävas för att nå intagen (Tabell 6.3).

När nu volymen av inträngande saltvatten uppskattats kan vi med hjälp av ekvation 2 i Stycke 5.6 bestämma hur långt in i systemet denna volym når.

**Etapp 1 - saltvatten strömmar över luckorna vid Norrström och Söderström**

Den sammanlagda volymen av saltvatten späds enligt antagandet om initialutspädningen (100 %). I detta skede fördubblas volymen och salthalten halveras, vilket ger en volym på $26{,}3352 \times 10^6$ $m^3$ och en salthalt på 1 psu.

**Etapp 2 - vattnet rinner vidare in i systemet**

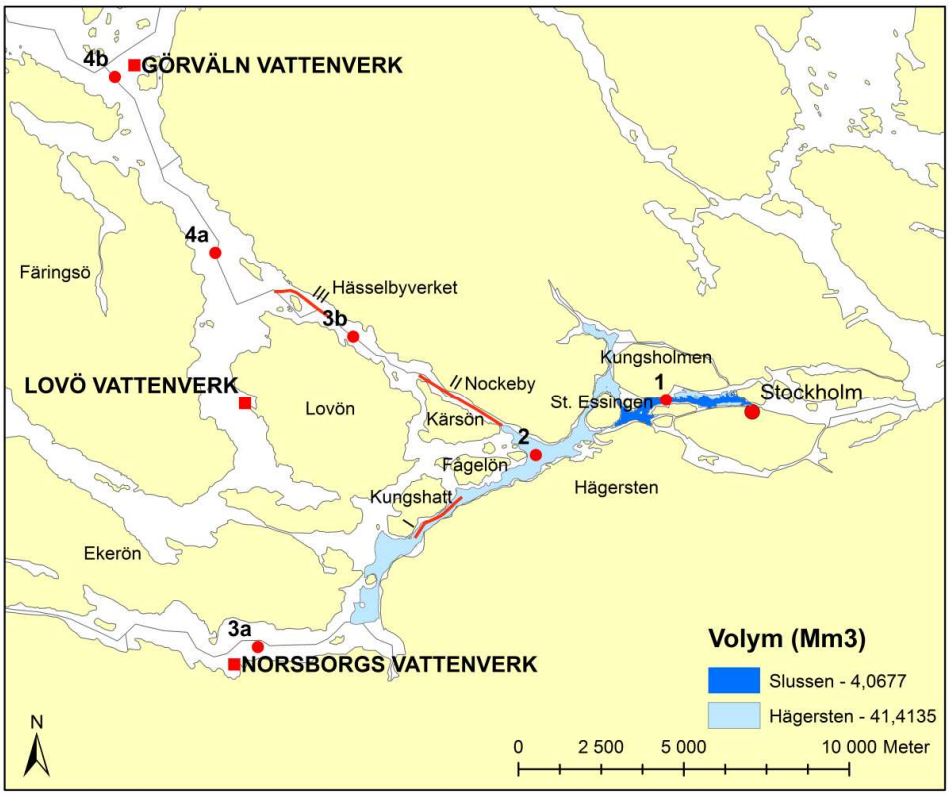
Bassängen vid Slussen fylls och det utspädda vattnet rinner vidare längs botten och över tröskeln in mot nästa bassäng, Hägersten. Samtidigt som det transporteras vidare sker ytterligare en utspädning av det salta vattnet enligt antagandet om blandning över trösklar (80 %). Det inträngande saltvattnet har nu en volym av $40{,}0815 \times 10^6$ $m^3$ och en salthalt på ca 0,56 psu. Denna volym av saltvatten är ej tillräckligt stor för att ta sig vidare in i systemet utan stannar i Hägerstens bassäng på ett djup upptill ca 11,5 m. Volymen upptill 11,5 m djup i Hägerstens bassäng har beräknats till $41{,}4135 \times 10^6$ $m^3$, alltså större än den volym inträngande saltvatten som beräknats. Utbredningen av salt vatten i etapp 1 och 2 visas i Figur 6.3.

*Tabell 6.7 Vattenstånd relativt medelvattenytan, beräknat flöde, varaktighet och volym för de tre tillfällen då vattenståndet varit högre än luckornas höjd sedan 1886.*

| Vst rel. MW (cm) | Flöde ($m^3/s$) | Varaktighet (h) | Volym ($m^3 \times 10^6$) |
|---|---|---|---|
| 115 | 18,0 | 5 | 0,3240 |
| 110 | 11,0 | 9 | 0,3564 |
| 105 | 5,5 | 8 | 0,1584 |

*Tabell 6.8 Havsvattenstånd relativt medelvattenytan med upptill 100 års återkomsttid beräknade för 2100 (vilka bygger på +1 m global höjning av vattenytan och reduktion för landhöjning), motsvarande flöde, antal tillfällen, volym per tillfälle och total volym, beräknat för en varaktighet på 9 h.*

| Återkomsttid (år) | Vst rel. MW (m) | Flöde ($m^3/s$) | Antal tillfällen | Volym/Tillfälle ($m^3 \times 10^6$) | Total volym ($m^3 \times 10^6$) |
|---|---|---|---|---|---|
| 2 | 1,00 | 0,9 | 15 | 0,0292 | 0,438 |
| 5 | 1,15 | 18,0 | 5 | 0,5832 | 2,916 |
| 10 | 1,25 | 35,0 | 2 | 1,1340 | 2,268 |
| 25 | 1,35 | 54,0 | 1 | 1,7496 | 1,7496 |
| 50 | 1,40 | 64,0 | 1 | 2,0736 | 2,0736 |
| 100 | 1,50 | 89,0 | 1 | 2,8836 | 2,8836 |




*Figur 6.3 Utbredning av saltvatten i etapp 1 och 2. Volymerna anges i miljoner $m^3$.*

# 7 Slutsatser

SMHI har beräknat vilka volymer av saltvatten som krävs för att kloridhalten skall överstiga 100 mg/l vid råvattenintagen till Görväln-, Lovö-, och Norsborgsverken i östra Mälaren. Resultatet av volymberäkningarna har kombinerats med kunskap om riskerna för extrema havsvattenståndshändelser för att påvisa om denna riskbild är relevant.

De volymer av saltvatten som krävs för att nå intagen har beräknats till:

- Norsborg: $17{,}8549 \times 10^6$ $m^3$
- Lovö: $23{,}1027 \times 10^6$ $m^3$
- Görväln: $25{,}5111 \times 10^6$ $m^3$

Den möjliga volym av inträngande saltvatten som ackumuleras under 100 årsperioden från 2000 till 2100 har uppskattats till $13{,}1676 \times 10^6$ $m^3$. Denna volym bygger på att ett antal extrema händelser kommer att inträffa och att de har en viss varaktighet. Därefter antas att det sker en utspädning då saltvattnet tar sig in i systemet. Under dessa förutsättningar som gjorts här är denna volym saltvatten inte tillräcklig för att nå de aktuella intagen före år 2100 utan stannar i Hägerstens bassäng på ett djup upptill ca 11,5 m och med en salthalt på ca 0,56 psu. Salthalten är alltså över den kritiska men mindre viktig i sammanhanget eftersom vattnet inte förväntas nå intagen.

# 8 Diskussion

Risken för att inträngande saltvatten når vattenverkens intag har beräknats utifrån en ackumulerad total volym av saltvatten. Denna volym av saltvatten har uppskattats med hjälp av antaganden om utspädning, förekomst av extrema händelser i dagens och framtidens klimat, dess varaktighet samt flödet över luckorna.

När ett extremt event inträffar kan inte förutses. Historiskt sett, sedan 1886, har havsvattenståndet varit högre än luckornas höjd vid 3 tillfällen. De två högsta havsvattenstånden når nivåer som har en återkomsttid på över 100 år och inträffade inom loppet av två månader. Detta är ett bra exempel på att en nivå med en relativt lång återkomsttid faktiskt förekommer och att två händelser med samma omfattning kan inträffa inom en kort tidsperiod. Samtidigt har de extrema havsvattenstånden inte någon lång varaktighet.

Ett havsvattenstånd med återkomsttiden 2 år i framtida klimat (2100) motsvarar ungefär ett vattenstånd med en återkomsttid på 75 år i dagens klimat. Det blir alltså vanligare med havsvattenstånd över luckornas höjd i ett framtida klimat. I dagens klimat är det havsvattenstånd med en återkomsttid på 50 år eller större som är högre än luckornas höjd. Beräkningarna för framtidens klimat bygger på +1 m global höjning av havsvattenytan från 1990-2100.

Vi har antagit en förenklad bild och räknat med en total ackumulerad volym av saltvatten, gjort antagande om utspädning och bortsett från diffusion. Det egentliga förloppet är att det sker ett inflöde och därefter ytterligare ett. Bassäng efter bassäng fylls gradvis upp och på dess väg späds vattnet ut med det omgivande vattnet både genom diffusion och genom vertikal omblandning. Den faktiska blandningen/utspädningen är okänd, både den initiala och den som sker i ett senare skede. Med betydligt högre utspädning kan det salta vattnet komma att nå råvattenintagen men en så stor utspädning kan anses som osannolikt. De antaganden om utspädning som gjorts i denna studie är högre än vad som visats i tidigare studier och vi vill på detta sätt vara på säkra sidan. Om saltvatteninbrotten är sällsynta hinner saltet diffundera upp mot ytan. Flödet är vanligen ut ur Mälaren och detta salt förs då ut ur systemet.

Med resonemang som förts och med antaganden om framtida extrema havsvattenstånd samt utspädning av det inträngande saltvattnet når alltså inte det salta vattnet råvattenintagen före 2100. Salthalten är efter utspädningen över den kritiska nivån på 0,1 psu men är mindre viktig i sammanhanget eftersom volymen saltvatten inte förväntas nå intagen före 2100.

### Fortsatt havshöjning efter 2100

Havshöjningen kommer inte att upphöra år 2100. De riktmärken som anges är att havets höjning år 2200 kan bli 2-4 meter högre än 1990 (Deltacommissie). Förutsatt en linjär höjning innebär det 10-30 cm ytterligare höjning på 10 år i tiden från 2100 till 2110. För Stockholms del reduceras även denna höjning av landhöjningen, vilket innebär att medelvattenytans höjning lokalt blir 5-25 cm, beroende på stigningstakt.

### Hur kritisk är onoggrannheter i djupdata?

Djupdatan är för vissa områden sparsam och satt i förhållande till att säkra sjöfarten. I de något mer känsliga partierna som är trånga och grunda där djupdatan var sparsam har mer noggrann djupdata beställts och använts. Med mer noggranna mätningar över hela det aktuella området skulle volymberäkningarna för Mälaren kunna bestämmas med större noggrannhet. Däremot så ger de mindre högupplösta djupdata en mindre volym vilket i det här fallet kan ses som konservativt.

# 9 Referenser


AMAP 2011. Snow, Water, Ice and permafrost in the Arctic. *SWIPA 2011*. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP). Executive Summary, Oslo. 15 pp.

Arneborg, L., Erlandsson C. P., Liljebladh, B., och Stigebrandt, A., 2004. *The rate of inflow and mixing during deep-water renewal in a sill fjord*. Limnol. Oceanogr., 49(3), 768-777.

Australian Department of Climate Change 2010. *Climate Change Risks to Australia's Coast* - A first pass national assessment. Updated version February 23, 2010.

Copenhagen Diagnosis 2009. *Updating the World on the Latest Climate Science*. I. Allison, N.L. Bindoff, R.A. Bindschadler, P.M. Cox, N. de Noblet, M.H. England, J.E. Francis, N. Gruber, A.M.Haywood, D.J. Karoly, G. Kaser, C. Le Quéré, T.M. Lenton, M.E. Mann, B.I. McNeil, A.J. Pitman, S. Rahmstorf, E. Rignot, H.J. Schellnhuber, S.H. Schneider, S.C. Sherwood, R.C.J. Somerville, K. Steffen, E.J. Steig, M. Visbeck, A.J. Weaver. The University of New South Wales Climate Change Research Centre (CCRC), Sydney, Australian, 60pp.

Deltacommissie 2008. *Working together with water – A living land builds for its future.* Findings of the Deltacommissie 2008. http://www.deltacommissie.com/doc/summary.pdf

Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap 2009. *Havsnivåstigning - Estimater av framtidig havsnivåstigning i norske kystkommuner*. Rapport från Det nasjonale klimatilpasninssekretariatet ved Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap. Reviderad utgåva september 2009.

IPCC 2001. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Houghton, J.T., Ding, Y., Griggs, D.J., Nouger, M., van der Linden, P.J. Dai, X., Maskel, K. and Johnsen, C.A. (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881 pp.

IPCC 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.

Københavns Kommune, 2011. Københavns Klimatilpasningsplan.

Kõuts, T. och Omstedt, A., 1993. *Deep water exchange in the Baltic Proper*. Tellus 45A: 311-324.

Lowe, J.A., Howard, T. P., Pardaens, A., Tinker, J., Holt, J., Wakelin, S., Milne, G., Leake, J., Wolf, J.,Horsburgh, K.,Reeder, T., Jenkins, G., Ridley, J., Dye, S., Bradley, S. 2009. *UK Climate Projections science report: Marine and coastal projections*. Met Office Hadley Centre, Exeter, UK. http://ukclimateprojections.defra.gov.uk/

Ministry of Natural Resources and Environment 2009. *Climate Change, Sea Level Rise Scenarios for Vietnam.* Report from the Ministry of Natural Resources and Environment of Vietnam, Hanoi.

Naturvårdsverket 2007. *FNs klimatpanel 2007: Den naturvetenskapliga grunden. Sammanfattning för beslutsfattare*. NV Rapport 5677, Stockholm.

Netherlands Environmental Assessment Agency, Royal Netherlands Meteorological Institute and Wageningen University and Research Centre 2009. *News in Climate Science and Exploring Boundaries – A Policy brief on developments since the IPCC AR4 report in 2007*. Netherlands Environmental Assessment Agency (PBL), Bilthoven, November 2009 PBL publication number 50011413.

NOAA 2009. *NOAA Response to Congressional Questions Regarding Climate Change*. The Honorable Joe Barton and the Honorable Fred Upton. *Questions for the Record from March 25th, 2009 Hearing on Climate Adaptation. Response Updated November 2009 to Include Additional Graphic.* (www.noaa.gov/images/climate_cooling_testimony111909.pdf )

Rummukainen M. och Källén E. 2009. *Ny klimatvetenskap 2006-2009. En kort genomgång av forskningen om klimatfrågans naturvetenskapliga grunder sedan IPCC AR4/WG I från 2007*. Rapport till Kommissionen för hållbar utveckling. Stockholm.

Svensk Energi, Svenska Kraftnät och SveMin 2007. *Riktlinjer för bestämning av dimensionerande flöden för dammanläggningar* – Nyutgåva 2007. ISBN 978-91-7622-197-6.

Vellinga, P., Katsman C.A., A. Sterl and J.J. Beersma, (eds.) 2008. *Exploring high end climate change scenarios for flood protection of the Netherlands: - an international scientific assessment.* International Scientific Assessment. Background document to Deltacommissie 2008.

World Bank (2012). *Turn Down The Heat - Why a 4°C Warmer World Must be Avoided*. A Report for the World Bank by the Potsdam Institute for Climate Impact Research and Climate Analytics. November 2012, Washington DC.

SMHI
Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut
601 76 NORRKÖPING
Tel 011-495 80 00 Fax 011-495 80 01