

**PROJEKTRAPPORT**

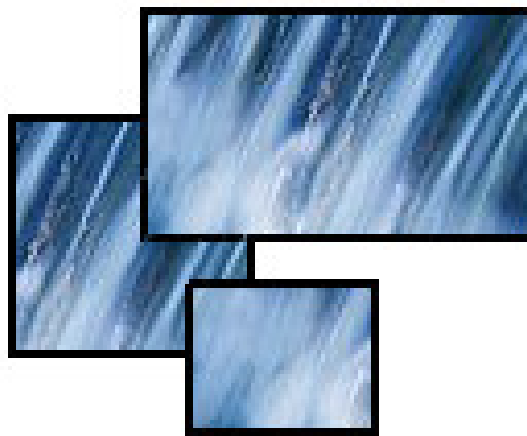
---

**KEMITEKNIK 2**

**KEMITEKNIK**

**HÖGSKOLENGENJÖRSUTBILDNINGEN**

# **Restaurering av Östersjön**



**KTH Stockholm  
2006**



KTH Kemiteknik

# PROJEKTRAPPORT

**TEMA:** Kemiteknik projekt  
**TITEL:** Restaurering av Östersjön  
**GRUPP:** 2  
**UPPDRAGSGIVARE:** Miljö- och samhällsbyggnadsdepartementet

**DELTAGARE:**  
Helen Aydin  
Silvana Bajlovic  
Johanna Cedergren  
Tina Jacobsson  
Ronja Krische  
Jenny Molén

**HANDLEDARE:** Ivars Neretnieks, Kemiteknik KTH  
**KONTAKTPERSON:** Helena André

**DATUM:** 2006-04-04

**EXAMINATOR:** Sara Naumann, Kemiteknik KTH

# 1 Sammanfattning

Enligt en utredning som publicerades av Miljövårdsberedningen har ekosystemet i Östersjön gått i baklås. Baklåshypotesen innebär att en reduktion av näringsutsläppen inte räcker för att återställa Östersjön till det tillstånd som rådde för 50 år sedan. Det här är en av orsakerna till att många diskuterar problematiken med Östersjön och försöker få fram lämpliga lösningar. Man har även blivit mer positiv till tekniska lösningar även de kanske kan leda till att Östersjöns specifika egenskaper ändras.

Vi har valt att titta på fyra olika tekniska lösningar för att sedan jämföra dessa och se vilken som verkar mest lämpad, både ur teknisk och ekonomisk synvinkel.

De tekniska lösningarna som studeras är: Tunnel, pipelines, saltning och rening av fosfor samt syresättning av bottenvatten. Alla beräkningar är baserade på 50 år, vilket innebär att våra tekniska lösningar skall byta ut/rena allt bottenvatten i Egentliga Östersjön under den perioden.

För att transportera saltvatten till de djupare syrefattiga delarna av Östersjön utvärderas möjligheten av en 20 mil lång tunnel genom Skåne. På grund av att allt bottenvatten skall bytas ut krävs det stora flöden vilket innebär att 12 tunnlar måste byggas med en diameter på 10 meter.

Ett annat alternativ som inte medför lika stora förändringar i Skånes berggrund är att lägga en pipeline genom Öresund och över Limhamströskeln. Pipelines skulle bli ungefär 10 mil långa och ligga på botten av Öresund. För att åstadkomma samma effekt som tunnlarna behövs 1576 pipelines med en diameter på 1,2 meter.

I förslaget Saltkaret utnyttjas det redan syresatta ytvattnet. Man tillsätter en saltlösning för att vattnet ska få rätt densitet och sedan pumpas det behandlade ytvattnet ned till den syrefattiga botten. Problemet med denna metod är att världsproduktionen av salt per år inte räcker till för att kunna driva denna anläggning.

I den sista metoden renas och syresätts bottenvatten på samma sätt som i ett reningsverk. Fosfor reagerar med en fällnings/flockningskemikalie och sedimenterar. I nästa steg syresätts vattnet med luft. Det behövs ca 500 stycken reningsanläggningar för att uppnå önskad effekt.

Efter att de olika lösningarna jämförts med varandra har vi dragit slutsatsen att syresättning och fosforreducering (reningsverket) av bottenvattnet är den lämpligaste metoden ur ekonomisk och teknisk synpunkt.

## 2 Innehållsförteckning

3	Inledning.....	5
4	Östersjön idag.....	6
4.1	Data Östersjön.....	7
5	Tekniska lösningar.....	7
5.1	Gemensamt för alla lösningar.....	7
5.2	Tunnel.....	8
5.2.1	Bakgrund.....	8
5.2.2	Tekniska beräkningar och beräkningar för investeringsbehov samt kostnadsuppskattning.....	9
5.2.3	Resultat.....	10
5.2.4	Slutsats.....	10
5.2.5	Diskussion.....	11
5.3	Pipeline.....	11
5.3.1	Bakgrund.....	11
5.3.2	Tekniska beräkningar och beräkningar för investeringsbehov samt kostnadsuppskattning.....	12
5.3.3	Resultat.....	13
5.3.4	Slutsats.....	13
5.3.5	Diskussion.....	13
5.4	Saltkaret.....	14
5.4.1	Bakgrund.....	14
5.4.2	Tekniska beräkningar och beräkningar för investeringsbehov samt kostnadsuppskattning av salt.....	15
5.4.3	Resultat.....	15
5.4.4	Slutsats.....	15
5.4.5	Diskussion.....	16
5.5	Reningsverk.....	16
5.5.1	Bakgrund.....	16
5.5.2	Tekniska beräkningar och beräkningar för investeringsbehov samt kostnadsuppskattning.....	17
5.5.3	Resultat.....	19
5.5.4	Slutsats.....	19
5.5.5	Diskussion.....	19
6	Jämförelse mellan lösningarna.....	20
7	Slutsats.....	20
8	Diskussion.....	20
8.1	Vilda idéer.....	22
9	Beteckningar.....	22
10	Referenser.....	23
10.1.1	Litteratur.....	23
10.1.2	Internet och personer.....	23
11	Bilagor.....	24
11.1	Beräkningar – Tunnel.....	24
11.2	Beräkningar - Pipeline.....	25
11.3	Beräkningar – Saltkaret.....	27
11.4	Beräkningar – Reningsverket.....	29

### 3 Inledning

Östersjön är idag ett stressat hav, det bräckta vattnet gör det svårt för många arter att överleva. Överskottet av fosfor och kväve i Östersjön har stor betydelse för övergödningen, som stressar havet ännu mer. Detta leder till ökande växtlighet. Då dessa bryts ned används syre. Tillförseln av syre till bottenvattnen är begränsad, det kraftiga språngskiktet förhindrar omblandning av vattenmassorna. Det syre som produceras i fotosyntesen ovan språngskiktet kommer då inte ända ner till botten. Det enda som då kan syresätta bottenvattnet är genom att nytt syrerikt saltvatten från Västerhavet kommer in genom Öresund, Stora och Lilla Bält. Detta utbyte sker inte så ofta och det har nu varit länge sedan ett stort utbyte skedde. Denna kombination av ett redan stressat hav, övergödning och ingen tillförsel av syrerikt saltvatten har lett till stora områden med syrebrist. Syrebristen leder till ökat läckage av fosfor från bottensedimenten och förvärrar övergödningen ytterligare.

Vår uppgift är att utreda möjligheter, effekter och kostnader av en teknisk restaurering av Östersjön. Vi har valt att titta på fyra olika metoder för att sedan jämföra dessa och se vilken som verkar mest lämpad både tekniskt och kostnadsmässigt. De tekniska lösningarna som studeras närmare är:

Tunnel genom Skåne för att på så sätt få in färskt saltvatten från väst, pipelines genom Öresund, saltning av ytvatten som sedan förs ner till bottenvattnet och rening av fosfor samt syresättning av bottenvattnet.

För att de tekniker som används och de åtgärder som görs ska kännas realistiska har vi valt att begränsa oss. Begränsningen innebär att vi räknar på att byta ut hela vattenvolymen under haloklinen i Egentliga Östersjön under 50 år. Det leder till en årlig volym på 56,2 km<sup>3</sup> som måste behandlas. Det är också i Egentliga Östersjön som den största arean av syrefria bottnar är lokaliserade. En annan mycket viktig faktor som vi måste ta i beaktning är skiktningen mellan salt- och bräcktwater, den får inte förstöras.

Enligt en utredning som publicerades av Miljövårdsberedningen (februari 2005) har ekosystemet i Östersjön gått i baklås. Baklåshypotesen innebär att en reduktion av näringsutsläppen inte räcker för att återställa Östersjön till det tillstånd som rådde för 50 år sedan.

Enligt utredningen behövs radikala åtgärder för att åstadkomma en sådan förändring. Åtgärder som nämns är:

- Konstgjord syresättning av djupvattnet
- Ökning av saltpulserna från Nordsjön genom muddring av de Danska sunden
- Sprängning av trösklar i havsbotten [15]

En grupp som har utvecklat flera olika tekniker som leder in stora mängder syrerikt vatten och höjer salthalten i Östersjön är **O<sub>2</sub>-gruppen**. O<sub>2</sub>-gruppen är en forskargrupp med Peter Kjaerboe, institutionen för energiteknik KTH, och innovatören Stefan Nyström. En av deras innovationer kallas för Saltlåset och den består av reglerbara klaffar som skulle placeras i Stora Bält. Klaffarna skulle vara öppna när saltvatten strömmar genom Stora Bält in i Östersjön och stängs när strömmen vänder tillbaka. Genom detta datorstyrda klaffsystem skulle man säkerställa stora mängder, upp till ca 400 km<sup>3</sup>, syre- och saltrikt vatten varje år till Östersjön. Kostnaderna för projektet beräknas till ca 1 miljard kr och driftkostnaderna uppskattas vara väldigt låga eftersom naturens klimatväxlingar och vågenergi utnyttjas [10].

## 4 Östersjön idag

Man kan säga att Östersjön både är ett ungt och ett gammalt hav. Gammalt för att det befinner sig i en tre miljarder år gammal sänka i ett urberg och ungt på grund av nedisningen som ägde rum för drygt 12000 år sedan [14].

Östersjön är ett "förändringarnas hav". Från början var vattnet marint, det vill säga hade hög salthalt. Sedan övergick det till att bestå av endast sötvatten för att sedan återgå till ett marint hav igen. Idag är Östersjön ett brackvattenhav, alltså ett hav med både söt- och saltvatten [14].

Det salta vattnet strömmar in genom Stora och Lilla Bält och genom Öresund. Det söta vattnet kommer från floder i tillrinningsområdet och från nederbörd. På grund av olika densitet skiktat sig vattnet, det mer salta vattnet lägger sig under det utsötade ytvattnet. Denna typ av skiktning, som medför en stor salthaltsskillnad i vertikalled, kallas haloklin. Detta medför att ytvattnet har en lägre salthalt än bottenvattnet. Det är just denna blandning mellan hav och sjö som gör Östersjön så speciellt.

Östersjön har en yta som är cirka 0,1 % av de totala världshavens yta, vilket motsvarar en area på något under 400 000 km<sup>2</sup>, se även tabell 1. Man kan dela in Östersjön i fyra mindre områden, Egentliga Östersjön, Riga bukten, Finska viken och Bottniska viken, se figur 1. Egentliga Östersjön sträcker sig från Ålands hav ner till de danska sunden. Medeldjupet ligger runt 60 meter och Östersjön anses därför vara ett grunt hav. Det finns ett fåtal djuphål, de två djupaste är Gotlandsdjupet (249 m) och Landsortsdjupet (459 m) [7].

Östersjön är ett mycket känsligt hav på grund av att utbytet med världshaven är en mycket långsam process, det tar upp emot 25 år innan allt vatten är utbytt. I och med detta stannar olika slags föroreningar kvar under lång tid och ger en negativ effekt [14].

De olika djupförhållandena i Bälten och Öresund är av avgörande betydelse då det gäller vattenomsättningen och de kemiska förhållandena [14]. Det är framförallt två trösklar som ställer till problem, Darsströskeln söder om Själland på 18 meter och Limhamströskeln på 8 meter i södra Öresund [7]. Trösklarna gör det svårt för saltvattnet att ta sig in i Östersjön och på så sätt syresätta bottenarna som blir alltmer syrefattiga i och med den ökande övergödningen. Övergödningen som beror på för stor tillförsel av näringsämnen, då speciellt kväve och fosfor leder till ökad växtlighet. Ett tydligt tecken på övergödningen är de kraftiga algbloomningar som återkommer varje sommar. Syrebristen i bottenvattnet uppstår då mikroorganismerna använder det tillgängliga syret till att bryta ned den ökade växtligheten. Idag är bottenarna i Egentliga Östersjön så gott som syrefria (0-2 ml O<sub>2</sub>/liter, eftertraktad syrehalt ligger runt 6 ml O<sub>2</sub>/liter) [8]. Detta medför att fosfor även löses ut ur sedimenten och förs upp till ytan, vilket ytterligare ökar övergödningen.



Figur 1. Karta över Östersjön och dess tillrinningsområde [13].

## 4.1 Data Östersjön

Tabell 1. Data över Östersjön [12]

Area	386 700 km <sup>2</sup>
Total Volym	20 800 km <sup>3</sup>
Volym under haloklinen i Egentliga Östersjön	2810 km <sup>3</sup> [17]
Medeldjup	56 m [14]
Max djup (Landsortsdjupet)	459 m
Tillrinning av sötvatten	+ 440 km <sup>3</sup> /år
Nederbörd	+ 225 km <sup>3</sup> /år
Avdunstning	- 185 km <sup>3</sup> /år
Saltvatteninflöde från danska sund	+ 470 km <sup>3</sup> /år
Brackvattenutflöde från danska sund	- 950 km <sup>3</sup> /år

## 5 Tekniska lösningar

### 5.1 Gemensamt för alla lösningar

Alla beräkningar är baserade på 50 år, vilket innebär att våra tekniska lösningar skall byta ut/repa allt bottenvatten (2810 km<sup>3</sup>) i Egentliga Östersjön under den perioden. Driftkostnaden per år beräknas med antagandet att *en kWh kostar en kr* och verkningsgraden är antagen till 0,7. Inom den kemiska industrin brukar man multiplicera med påläggsfaktorn på 4,5 [20] för att på så sätt kunna inkludera kostnader för installation, frakt, försäkringar etc. Denna påläggsfaktor kan inte direkt tillämpas på dessa lösningar, därför har en påläggsfaktor på 2 antagits. Inga kostnader eller investeringsbehov för pumpar har tagits med i beräkningarna, då inga bra uppgifter på pumpar har kunnat fås.

#### Formler [1]

$$S = \frac{\pi D^2}{4} \quad \text{Tvärsnittsarea}$$

$$q = V_a \cdot S_a = V_b \cdot S_b \quad \text{Volymflöde}$$

$$\frac{p_a}{\rho} + gZ_a + \frac{\alpha_a \cdot V_a^2}{2} + \eta W_p = \frac{p_b}{\rho} + gZ_b + \frac{\alpha_b \cdot V_b^2}{2} + h_f \quad \text{Bernoullis ekvation}$$

$$\alpha_a = \alpha_b \quad \text{Korrektionsfaktor}$$

$$p_a + \rho g Z_a + \eta W_p \rho = p_b + \rho g Z_b + h_f \rho$$

$$p_a + \rho g Z_a = p_b + \rho g Z_b$$

$$\eta W_p = h_f$$

$$h_f = \left( 4f \frac{L}{D} + K_c + K_f + K_e \right) \cdot \frac{V^2}{2} \quad \text{Friktionsförlust}$$

$$K_c = 0,4 \left( 1 - \frac{S_b}{S_a} \right) \quad K_e = \left( 1 - \frac{S_a}{S_b} \right)^2$$

$$f = f \left( N_{Re}, \frac{k}{D} \right) \quad \text{Friktionsfaktor är funktion av Reynolds tal och } \frac{k}{D}, \text{ där } k \text{ är rårhetsfaktor för betong}$$

$$N_{Re} = \frac{D \cdot V \cdot \rho}{\mu} \quad \text{Reynolds tal}$$

$$\Delta p_f = \rho g \Delta Z = \rho h_f = \rho \cdot 4 \cdot f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2} \quad \text{Tryckfall}$$

$$P = q \cdot \Delta p_f \quad \text{Effekt}$$

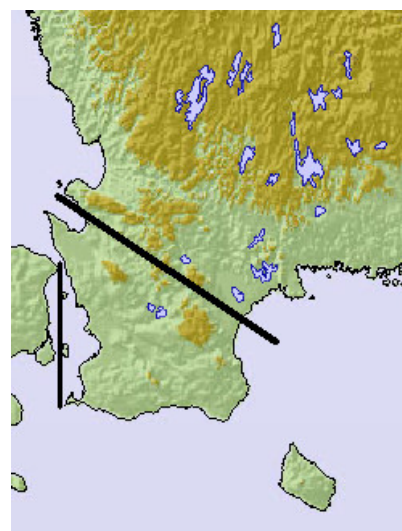
## 5.2 Tunnel

### 5.2.1 Bakgrund

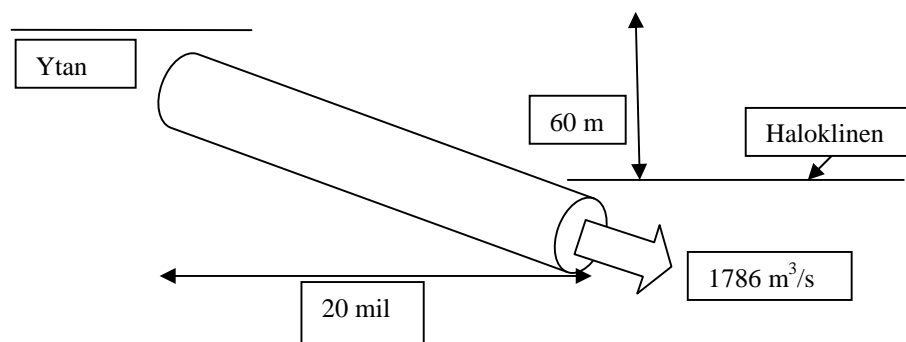
För att transportera saltvatten till de djupare syrefattiga delarna av Östersjön utvärderas möjligheten av en tunnel genom Skåne. Tunnelmynningen på västkusten är tänkt strax norr om Ängelholm och mynningen på östkusten strax norr om Kivik, se figur 2. Längden på tunneln blir cirka 20 mil. Då stora områden i Östersjön är syrefattiga krävs stora flöden genom tunneln, vilket leder till en stor diameter. Tanken är att föra ner syrerikt salt ytvatten från västkusten ner under haloklinen i Östersjön, se figur 3. Viktigt är att salthaltsskillnaden mellan det vatten som tas från väst- och leds till östkusten inte är för stora. Detta är anledningen till att ytvatten tas från västkusten, det har en lägre salthalt. Haloklinen i Bornholmsbukten ligger ungefär på 60 meters djup. Transporten av havsvattnet in till Östersjön kommer att ske med hjälp av pumpar. Tunneln dimensioneras för att byta ut hela Egentliga Östersjöns vatten under haloklinen under en 50-årsperiod, det innebär ett flöde genom tunneln på 56,2 km<sup>3</sup>/år.

Ett projekt av denna storleksordning kräver noggranna förundersökningar, bland annat en geologisk undersökning

av berggrunden, där man ser vilka bergarter och svaghetszoner som finns. Därefter bestäms exakt var tunneln ska gå [16]. Då det aldrig tidigare gjorts en så pass lång tunnel, är det svårt att exakt veta hur man ska gå tillväga. Det troligaste är att arbetet görs i flera delprojekt, 15-25 km långa. Det innebär ungefär 10 delprojekt, där varje del bland annat kräver upplag för uttaget berg [16]. Enligt Skanska är det troligast att tunneln borras med en TBM-maskin (tunnelbormaskin) då den klarar av att hantera olika sorters berggrund. Sedan 'linas' tunneln med betong.



Figur 2. Placering av tunnel och pipeline.



Figur 3. Skiss över hur tunneln är placerad, sett från sidan.



## 5.2.2 Tekniska beräkningar och beräkningar för investeringsbehov samt kostnadsuppskattning

Det antalet tunnlar som behövs beror på vilken hastighet man har. Vid 1 m/s och en diameter på 10 m behövs det:

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{q/V_1}{\frac{\pi \cdot D^2}{4}} = \frac{1782}{78,5} \approx 23 \text{ st tunnlar}$$

Strömningen i tunnarna är turbulent och sandråheten då det är betong är 0,01-0,001, det ger att friktionsfaktorn  $f = 0,004$  [1]. De förluster som uppstår i tunnarna uppkommer i skarvar ( $K_f$ ), expanderingar ( $K_e$ ), kontraktioner ( $K_c$ ) och från friktionen mellan vattnet och tunnelväggarna. Då tunnarna är så långa har endast friktionsförlusten mellan vattnet och väggarna betydelse och  $K_e$ ,  $K_c$  och  $K_f$  är noll. Se tabell 6 för beteckningar.

$$h_f = \left( 4f \frac{L}{D} \frac{m}{m} \right) \cdot \frac{V^2}{2} \left( \frac{m}{s} \right)^2 = \left( 4 \cdot 0,004 \cdot \frac{200000}{10} \right) \cdot \frac{1^2}{2} \approx 160 \frac{m^2}{s^2}$$

Friktionsförlusterna beror endast på hastigheten, då övriga termer är konstanta. Det tryckfall som uppstår i tunneln uppkommer till följd av friktionsförlusterna.

$$\Delta p_f = \rho g \Delta Z_f = \rho h_f = 1000 \frac{kg}{m^3} \cdot 160 \frac{m^2}{s^2} = 160000 \frac{N}{m^2}$$

Den effekt som tillförs måste kompensera tryckfallet som uppstår och den verkningsgrad (0,7) som pumparna har.

$$P = \frac{q \cdot \Delta p_f}{\eta} = \frac{1782 \cdot 160000 \frac{m^3}{s} \cdot \frac{N}{m^2}}{0,7} \approx 4,0 \cdot 10^8 \text{ W}$$

Driftkostnaden per år beräknas med antagandet att en kWh kostar en kr. Kostnaden för tunnarna baseras på en återbetalningstid på 50 år och en meterkostnad på 400 000 kr [19] samt en påläggsfaktor. Kostnaden per tunnel är alltid densamma, 160 miljarder kr. För hastigheten 1 m/s blir byggkostnaden för tunnarna:

$$\frac{400000 \cdot 200000 \cdot 2 \cdot 23}{50} = 73,6 \cdot 10^9 \text{ kr / år}$$

Räntan, antas vara 2 %, per år beräknas som ett medelvärde mellan första årets ränta (73,6 miljarder kr) och sista årets ränta (0 kr) och är 36,8 miljarder kr.

Den totala kostnaden per år fås genom att addera driftkostnaden, byggkostnaden och räntan:

$$3,5 \cdot 10^9 + 73,6 \cdot 10^9 + 36,8 \cdot 10^9 \approx 114 \cdot 10^9 \text{ kr / år}$$

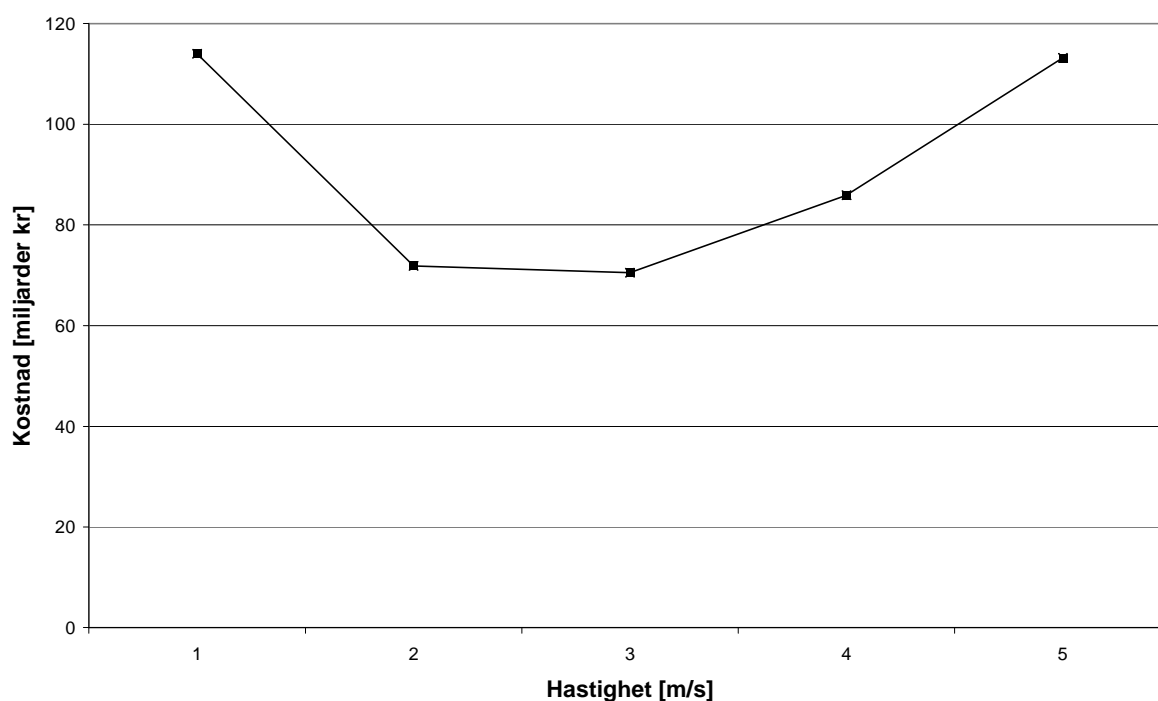
Investeringsbehovet beror endast på antalet tunnlar och blir i detta fall 3680 miljarder kr.

Samma beräkningsgång har använts för hastigheterna 2,3,4 och 5 m/s. För mer detaljerade beräkningar se bilaga 11.1.

### 5.2.3 Resultat

Tabell 2. Kostnaden per år och investeringsbehovet för tunnlrar, i miljarder kr.

Hastighet [m/s]	1	2	3	4	5
Antal tunnlrar	23	12	8	6	5
Fast kostnad	110,4	57,6	38,4	28,8	24
Driftkostnad	3,6	14,3	32,1	57,1	89,2
Total kostnad	114	71,9	70,5	86	113
Investeringsbehov	3680	1920	1280	960	800



Figur4. Totala kostnaden för tunnlrar vid olika hastigheter.

### 5.2.4 Slutsats

Tabell 2 visar hur kostnaden och investeringsbehovet förändras vid olika hastigheter i tunnlarna. Driftkostnaden ökar med ökande hastighet, däremot minskar den fasta kostnaden samt investeringsbehovet. I figur 4 ser man att de lägsta totala kostnaderna fås vid en hastighet på 3 m/s.

Det tabell 2 och figur 4 tydligt visar är att den mest optimala hastigheten är 3 m/s. Det innebär att 8 tunnlrar måste byggas.

## 5.2.5 Diskussion

Vid ett projekt av denna storleksordning finns det många saker som skulle kunna bli problematiska. Dels vid själva byggandet av tunneln, under tiden den används och efteråt, men även den inverkan som själva saltvattensflödet skulle ha på Östersjön. Eftersom salthalten på det vatten som tas från västkusten inte är identisk med den på ostkusten så kommer det att medföra en förhöjning av salthalten i Östersjöns bottenvatten. En annan risk kan vara att det salta havsvattnet blandas upp med ytvattnet. Vad det har för konsekvenser råder det delade meningar om. Frågor som man bör ta ställning till innan själva byggandet av tunneln är till exempel: Hur ska tunneln kunna byggas utan att det kommer in vatten från omgivningen? Var ska allt uttaget bergsmaterial ta vägen? Borrteknik? När tunneln sedan är i drift är det viktigt att den håller under de 50 år som beräkningarna är baserade på. Tunneln som man närmast kan jämföra med är den som går genom Hallandsåsen, vilken är dimensionerad för att hålla i 120 år [19].

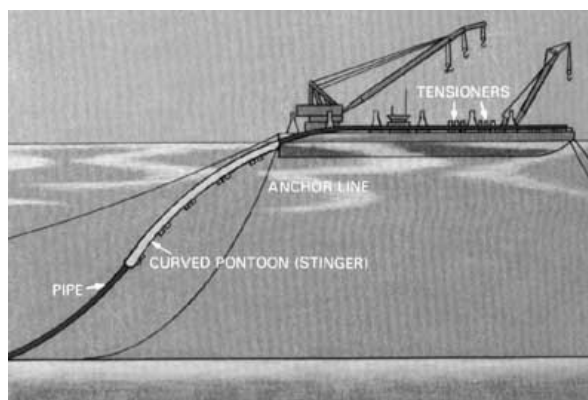
Det är också viktigt att tunneln är så pass tät att grundvattnet inte blir förstört på grund av att saltvatten läcker ut ur tunneln eller om grundvattnet i sin tur börjar läcka in. Vad gör vi om detta ändå sker? Tillflödet måste då kunna stoppas för att åtgärda problemet. Andra saker som bör beaktas är hur omgivningen precis där pumparna suger in vatten till tunnarna påverkas? Krävs det att ett stort område spärras av för att undvika skador på såväl pumpar som miljön runt omkring? Innan byggprojektet kan påbörjas måste man även få tillstånd från myndigheter. Även allmänhetens och olika specialisters åsikter och synpunkter är av stor betydelse.

## 5.3 Pipeline

### 5.3.1 Bakgrund

Ett annat alternativ som inte medför lika stora förändringar i Skånes berggrund är att lägga en pipeline genom Öresund och över Limhamströskeln, se figur 2.

Limhamströskeln är väldigt grund, ungefär 8 m [7] och stoppar därmed en del av det saltvatten som är på väg mot Östersjön. Genom att låta en pipeline mynna på Östersjö-sidan av tröskeln efterliknas den naturliga vägen samtidigt som inflödet blir större. Pipelinen skulle bli ungefär 10 mil lång och ligga på botten av Öresund. Även här är det viktigt att ta vatten som inte har för hög salthalt så att det passar med vattnet i Östersjön. Flödet skulle vara detsamma som i tunneln, för att lättare kunna jämföra alternativen. Ofta när man lägger offshore pipelines, som det handlar om i detta fall, använder man sig av en stor båt. Pipelinen svetsas samman på båten och får sedan, bit för bit, sjunka ner till botten bakom båten, se figur 5. Även andra metoder finns till exempel att dykare svetsar samman pipelinen direkt på botten [3]



Figur 5. Visar hur pipelines läggs på botten [4].

### 5.3.2 Tekniska beräkningar och beräkningar för investeringsbehov samt kostnadsuppskattning

Det antalet pipelines som behövs beror på vilken hastighet man har. Vid 1 m/s och en diameter på 1,2 m behövs det:

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{q/V_1}{\frac{\pi \cdot D^2}{4}} = \frac{1782}{1,13} \approx 1576 \text{ st pipelines}$$

Strömningen i pipelines är turbulent och sandråheten då det är stål är 0,00015, det ger att friktionsfaktorn  $f = 0,003$  [1]. De förluster som uppstår i pipelines uppkommer i skarvar ( $K_f$ ), expanderingar ( $K_e$ ), kontraktioner ( $K_c$ ) och från friktionen mellan vattnet och rörväggarna. Då pipelines är så långa har endast friktionsförlusten mellan vattnet och väggarna betydelse och  $K_e$ ,  $K_c$  och  $K_f$  är noll.

$$h_f = \left( 4f \frac{L}{D} \frac{m}{m} \right) \cdot \frac{V^2}{2} \left( \frac{m}{s} \right)^2 = \left( 4 \cdot 0,003 \cdot \frac{100000}{1,2} \right) \cdot \frac{1^2}{2} \approx 500 \frac{m^2}{s^2}$$

Friktionsförlusterna beror endast på hastigheten, då övriga termer är konstanta. Det tryckfall som uppstår i pipelines uppkommer till följd av friktionsförlusterna.

$$\Delta p_f = \rho g \Delta Z_f = \rho h_f = 1000 \frac{kg}{m^3} \cdot 500 \frac{m^2}{s^2} = 500000 \frac{N}{m^2}$$

Den effekt som tillförs måste kompensera tryckfallet som uppstår och den verkningsgrad (0,7) som pumparna har.

$$P = \frac{q \cdot \Delta p_f}{\eta} = \frac{1782 \cdot 500000 \frac{m^3}{s} \cdot \frac{N}{m^2}}{0,7} \approx 12,7 \cdot 10^8 \text{ W}$$

Driftkostnaden per år beräknas med antagandet att en kWh kostar en kr. Kostnaden för pipelines baseras på en återbetalningstid på 50 år, en ränta på 2 % och en meterkostnad på 6000 kr [18], se bilaga 11.2 för beräkning, samt en påläggsfaktor. Kostnaden per pipeline är alltid densamma, 1,2 miljarder kr. För hastigheten 1 m/s blir byggkostnaden för pipelines:

$$\frac{6000 \cdot 100000 \cdot 2 \cdot 1576}{50} = 37,8 \cdot 10^9 \text{ kr / år}$$

Räntan per år beräknas som ett medelvärde mellan första årets ränta (37,8 miljarder kr) och sista årets ränta (0 kr) och är 18,9 miljarder kr.

Den totala kostnaden per år fås genom att addera driftkostnaden, byggkostnaden och räntan:

$$11,15 \cdot 10^9 + 37,8 \cdot 10^9 + 18,9 \cdot 10^9 \approx 67,9 \cdot 10^9 \text{ kr}$$

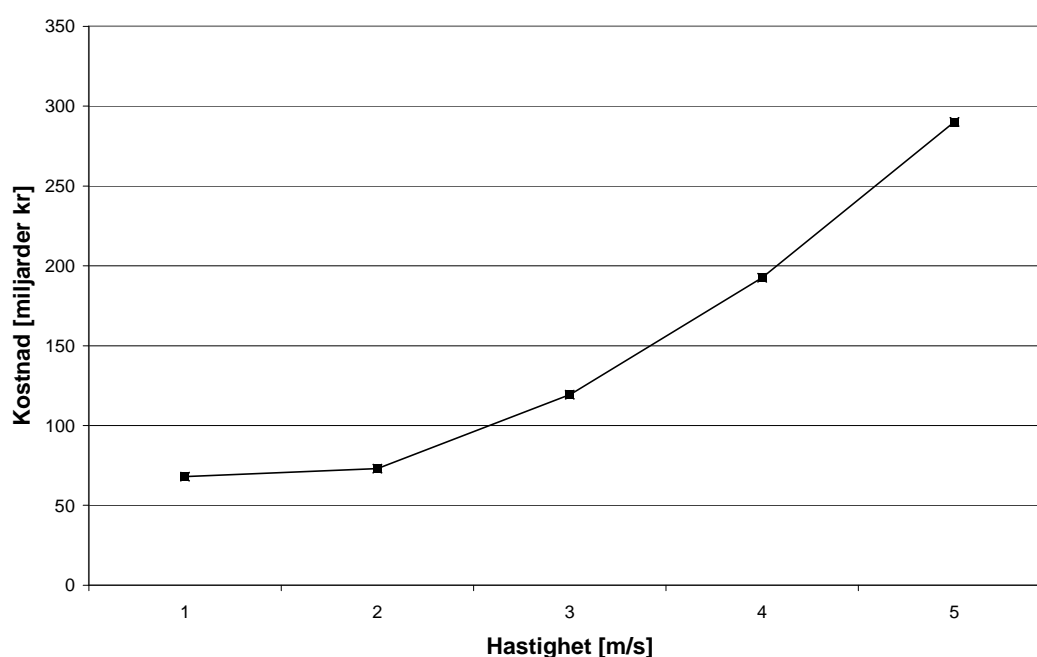
Investeringsbehovet beror endast på antalet pipelines och blir i detta fall 1891 miljarder kr.

Samma beräkningsgång har använts för hastigheterna 2,3,4 och 5 m/s. Mer ingående beräkningar finns i bilaga 11.2.

### 5.3.3 Resultat

Tabell 3. Kostnaden per år och investeringsbehovet för pipelines, i miljarder kr.

Hastighet [m/s]	1	2	3	4	5
Antal pipelines	1576	788	526	394	316
Fast kostnad	56,7	28,4	18,9	14,2	11,4
Driftkostnad	11,2	44,6	100	178,4	278,8
Total kostnad	67,9	73	119	192,6	290,1
Investeringsbehov	1890	946	631	473	379



Figur 6. Totala kostnaden för pipelines vid olika hastigheter.

### 5.3.4 Slutsats

I tabell 3 ser man vad det medför om man ändrar hastigheten i pipelines. Tydligt är att investerings behovet minskar med minskande antal pipelines samtidigt som driftkostnaderna ökar. Figur 6 visar att den lägsta kostnaden fås vid hastigheten 1 m/s, däremot är investeringsbehovet då som störst. Det innebär att den lägsta kostnaden fås vid hastigheten 1 m/s och 1576 pipelines.

### 5.3.5 Diskussion

För att uppnå önskad effekt behövs ett stort antal pipelines, vilket skulle täcka en stor del av Öresunds botten. De olika konsekvenser som kan uppstå som en följd av lösningen är bland annat att vissa arter kan komma att försvinna vilket i sin tur leder till att ekosystemets balans rubbas. Eftersom pipelines area är ganska stor finns det även risk att pipelines kan störa det naturliga inflödet av saltvatten. En fördel med pipelines är att om de börjar läcka till omgivningen så kommer det inte att orsaka några större skador, vilket ger ett lägre krav på täthet i jämförelse med till exempel tunnlar.

## 5.4 Saltkaret

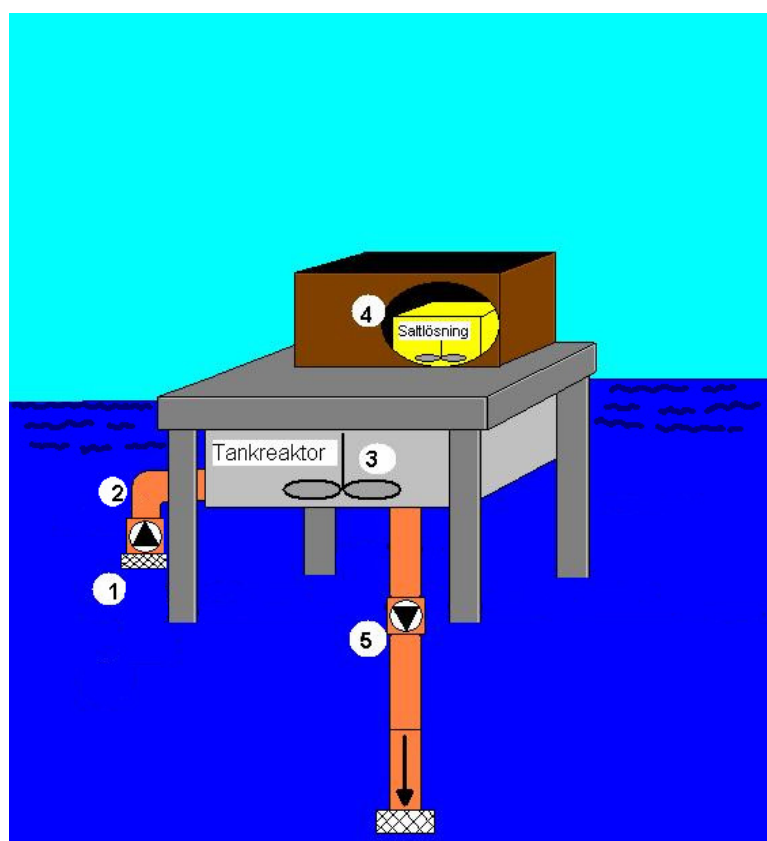
### 5.4.1 Bakgrund

Saltkaret bygger på idén att utnyttja det redan syresatta ytvattnet för att syresätta bottenvattnet i Egentliga Östersjön. Vad man måste göra är att se till att ytvattnet får en lämplig salthalt och temperatur.

Det ytvatten som ska behandlas har idag en salthalt mellan 7-8 ‰ [2]. Detta innebär att man kommer att behöva blanda ytvattnet med salt för att på så sätt öka salthalten till mellan 10-13 ‰ [2], vilket stämmer överens med den salthalt som bottenvattnet har. Det behandlade ytvattnet pumpas sedan ner till de syrefattiga bottenarna. Om salthalten inte balanseras förstörs skiktningen mellan det salta och det bräckta vattnet.

”Saltkaret” är tänkt att ligga ute till havs på en havsplattform. Plattformen är monterad i höjd med vattenytan så att tankreaktorn som sitter under hamnar i vattnet. Ytvattnet pumpas in i tankreaktorn. I tanken sker en omrörning av ytvattnet och saltlösning som förberetts i en satsreaktor som ligger ovanför plattformen. Att tillsätta ett redan löst salt ger en mer optimerad omblandning. Tankreaktorn är utrustad med sensorer och kylsystem som kontrollerar salthalten samt temperaturen. Därefter pumpas det behandlade ytvattnet med hjälp av rör ner till den syrefattiga botten, se figur 7.

En begränsande faktor skulle kunna vara världsproduktionen av salt som ligger på 225 miljoner ton/år [11].

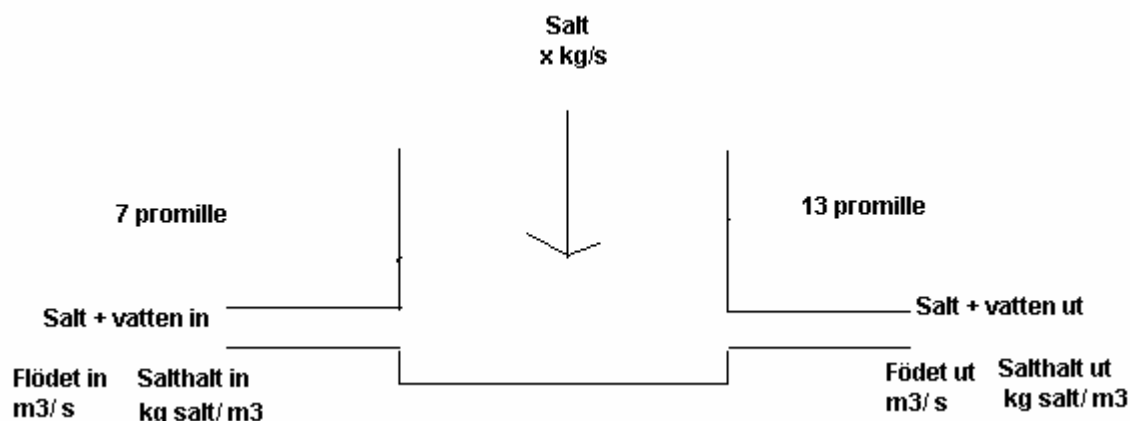


Figur 7. Saltkaret.

#### Beskrivning steg för steg

1. Rørets inlopp befinner sig strax under vattenytan och skyddas av ett filter så att inte större föremål följer med in.
2. Det bräckta ytvattnet pumpas in i tankreaktorn.
3. I tankreaktorn tillsätts saltlösningen under omrörning. Reaktorn är utrustad med sensorer samt kylsystem för kontroll av olika parametrar.
4. I satsreaktorn förbereds saltlösningen. Saltlösningen pumpas varterfer ner i tankreaktorn.
5. Det behandlade ytvattnet pumpas ner till rätt djup under haloklinen.

### 5.4.2 Tekniska beräkningar och beräkningar för investeringsbehov samt kostnadsuppskattning av salt



Figur 8. Visar materialbalans för salt i Saltkaret.

Ytvattnet idag har en halt på cirka 7 promille och bottenvattnet en halt på cirka 13 promille, det som behövs är att den totala mängd salt som ska tillsättas för att uppnå 13 promille beräknas fram. Sju promille betyder att det går 7 kg salt på 1000 kg vatten. För att veta vilken halt sju promille och 13 promille motsvaras av multipliceras den med densitet. Vattnet plus saltets densitet antas motsvara densiteten för rent vatten (1000 kg/ m<sup>3</sup>).

$$Salthalt_{in} = \frac{7 \cdot kg \cdot 1000 \cdot kg}{1000 \cdot kg \cdot m^3} = \frac{7kg}{m^3}$$

Beräkningarna utförs på samma sätt för att få motsvarande mängd för 13 promille.

Saltvatten pumpas in i tankreaktorn med ett flöde på 3,6 m<sup>3</sup>/s, där tillsätts saltlösningen till ytvattnet och det behandlade ytvattnet pumpas ut med lika stort flöde.

Flödet in multipliceras med salthalten från det bräckta vattnet (7 kg/m<sup>3</sup>) och flödet ut multipliceras med salthalten för det salta vattnet (13 kg/m<sup>3</sup>). Dessa subtraheras sedan med varandra och massan salt som ska tillsättas per sekund i tanken fås fram, se även figur 8:

$$\frac{Flödet_{ut} \cdot Salt_{ut} \cdot kg}{s} - \frac{Flödet_{in} \cdot Salt_{in} \cdot kg}{s} = \frac{Salt \text{ kg}}{s} \rightarrow \frac{3,6 \cdot 13 \cdot kg}{s} - \frac{3,6 \cdot 7 \cdot kg}{s} = \frac{21,6kg}{s}$$

Den totala mängden salt per år och saltkar beräknas till  $6,8 \cdot 10^5$  ton och för 495 stycken saltkar till  $336 \cdot 10^6$  ton. Priset för ett ton salt är 48 kronor [11], vilket ger en årligkostnad för alla saltkaren på 16 miljarder kr per år

För mer detaljerade beräkningar se bilaga 11.3.

### 5.4.3 Resultat

Den totala mängd salt som skulle behöva tillsättas per år är 336 miljoner ton till en kostnad av 16 miljarder kronor.

### 5.4.4 Slutsats

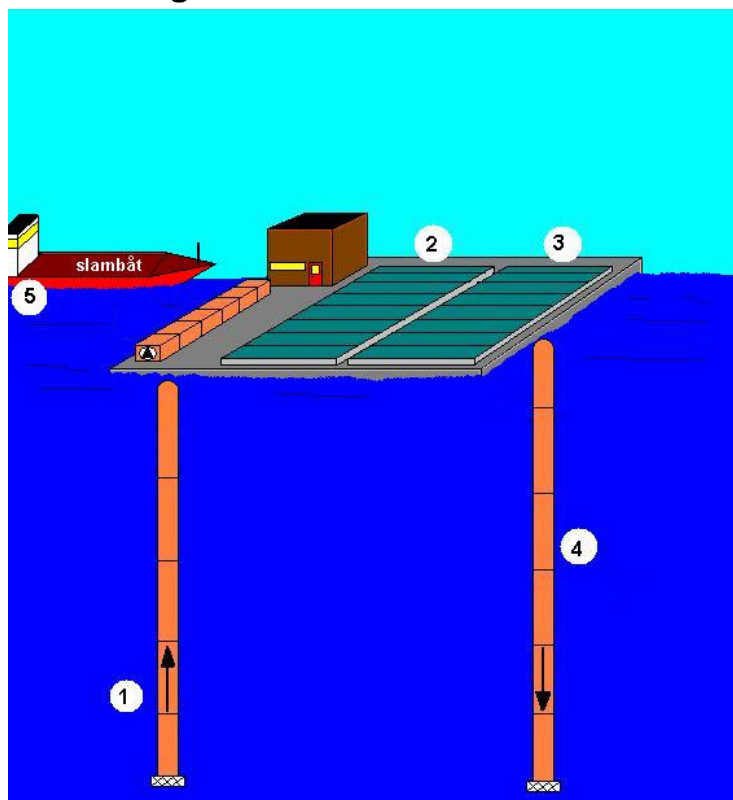
Behovet av 336 miljoner ton salt per år överskrider den totala världproduktionen av salt som ligger på 225 miljoner ton per år. Detta resultat medför att projektet saltkaret inte kan genomföras.

## 5.4.5 Diskussion

Andra saker som vi bör ta ställning till: Kommer det salt som utvinns från olika hav att passa Östersjön eller blir vi tvungna att tillsätta olika mineraler för att få rätt sammansättning? Skulle ytvattnet som pumpas in kunna innehålla olika föroreningar som i sin tur påverkar bottenvattnet? Hur kommer skiktningen att påverkas, kommer haloklinen att stiga och det brackvattenvolumen att minska, eller kommer de naturliga in- och utflödena att klara av detta. Hur påverkar detta i sin tur djur- och växtlivet? Torsken kan komma att trivas bra, men vad händer med de övriga arterna? Hur kommer anläggningarna att påverka livet i havet?

## 5.5 Reningsverk

### 5.5.1 Bakgrund



Figur 9. Reningsverk

Ett annat alternativ kan vara att rena och syresätta bottenvattnet på samma sätt som i ett reningsverk. Detta genom att bottenvattnet pumpas upp på en plattform som är belägen vid havsytan. På plattformen finns ett reningsverk bestående av en stor bassäng som i sin tur är uppdelad i mindre delbassänger. (Reningsverket är baserat på Himmerfjärdsverkets reningsanläggning, där bassängerna har en gemensam volym på  $3600\text{m}^3$  [5,6]). Bassängerna befinner sig i vattnet, detta på grund av att driftkostnaderna för att pumpa upp vattnet ovan ytan skulle bli alldeles för höga. I den första bassängen, sedimenteringsbassängen renas vattnet från fosfor genom att en fällnings/flockningskemikalie tillsätts. Fosfor fälls ut och bildar flockar som sedan sedimenterar och

blir slam. Det bildade fosforslammet fraktas med hjälp av tankfartyg till land för att användas bland annat inom jordbruket. Därefter fortsätter vattnet till en luftningsbassäng där det syresätts med hjälp av luftning. I luftningsbassängen sker kontinuerliga kontroller av syrehalt och temperatur. När hela reningsprocessen är klar pumpas vattnet tillbaka ner till botten.

#### Beskrivning steg för steg, se figur 9

1. Syrefattigt bottenvattnet pumpas upp till bassängerna.
2. Fällnings/flockningskemikalie tillsätts för rening av fosfor.
3. Syresättning av det reade vattnet.
4. Renat och syresatt vatten pumpas ned till botten.
5. Slammet hämtas med tankfartyg.



### 5.5.2 Tekniska beräkningar och beräkningar för investeringsbehov samt kostnadsuppskattning

Flödet på  $3,6 \text{ m}^3/\text{s}$  är baserat på reningsverket, Himmerfjärdsverkets, maxflöde [6].

Driftkostnaden för vår luftningsbassäng är uppskattad efter Himmerfjärdsverkets dygnskostnad för luftning i samband med biologisk reduktion. Uppskattningen baseras på att vi har ett större flöde men utan den biologiska reduktionen och Himmerfjärdsverket har ett mindre flöde men med den biologiska reduktionen. Vårt större flöde utan den biologiska reduktionen gör att vi kan uppskatta vår dygnskostnad till den samma som Himmerfjärdsverket. Byggekostnaden för luftningsanläggningen antas vara i samma storlek som fosfor anläggningen.

Mängd vatten som ska renas per år

$$\frac{2,81 \cdot 10^{12} \text{ m}^3}{50 \text{ år}} = 5,62 \cdot 10^{10} \text{ m}^3 / \text{år}$$

Mängd fällnings/flocknings kemikalie som skulle behöva användas per  $\text{m}^3$  är 25 g. Kostnaden för fällnings/flocknings kemikalie är 1200 kr/ton. [9]

$$25 \text{ g} / \text{m}^3 \cdot 5,62 \cdot 10^{10} \text{ m}^3 / \text{år} \cdot 10^{-6} = 1,40 \cdot 10^6 \text{ ton} / \text{år}$$

Kostnad för fällningskemikalie per år

$$1,40 \cdot 10^6 \text{ ton} / \text{år} \cdot 1200 \text{ kr} / \text{ton} = 1,68 \text{ Miljarder kr} / \text{år}$$

Flöde [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] som skall behandlas under 50 år är:

$$\frac{2,81 \cdot 10^{12}}{1,5768 \cdot 10^9} \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 1782,1 \text{ m}^3 / \text{s}$$

Antal plattformar som kommer att behövas baserat på ett max flöde av  $3,6 \text{ m}^3/\text{s}$ :

$$\text{Plattformar} = \frac{q_{\text{tot}}}{q_{\text{max}}} \rightarrow \frac{1782 \text{ m}^3 / \text{s}}{3,6 \text{ m}^3 / \text{s}} = 495 \text{ stycken}$$

Investeringsbehovet per plattform baserad på bassänganläggningar som totalt rymmer  $3600 \text{ m}^3$  vatten är 720 miljoner kr [5]. Det totala investeringsbehovet för alla plattformar uppgår till en summa av:

$$720 \text{ miljoner kr} \cdot 495 \text{ plattformar} = 356 \text{ miljarder kr}$$

Hastigheten i rören är baserad på 1 m/s

Först beräknas tvärsnittsarean för rören, flödet dividerat med hastigheten. Tvärsnittsarean används sedan för att beräkna vilken diameter rören får:

$$S = \frac{q}{V} = \frac{3,6 \text{ m}^3 / \text{s}}{1 \text{ m} / \text{s}} = 3,6 \text{ m}^2$$

$$D = \sqrt{\frac{S \cdot 4}{\pi}} = \sqrt{\frac{3,6 \text{ m}^2 \cdot 4}{3,14}} = 2,1 \text{ m}$$

Strömningen i rören är turbulent och sandrâheten då det är betong är 0,01-0,001, vilket ger ett medelvärde på sandrâheten på 0,0055. Friktionsfaktorn,  $f$ , som baseras på flödets fem olika hastigheter och rör diameter beräknas till ett medelvärde av 0,007 [1]. De förluster som uppstår i rören uppkommer i skarvar ( $K_f$ ), expansioner ( $K_e$ ), kontraktioner ( $K_c$ ) och från friktionen mellan vattnet och rörväggarna. I det här fallet är  $K_c = 0,4$  och  $K_e = 1$ . Det finns inga krökningar på rören vilket ger  $K_f = 0$ . Följande totala friktionsförluster beräknas till:

$$h_f = \left( \left( 4f \frac{L}{D} \frac{m}{m} \right) + K_c + K_e \right) \cdot \frac{V^2}{2} \left( \frac{m}{s} \right)^2 \Rightarrow$$

$$h_f = \left( 4 \cdot 0,007 \cdot \frac{60}{2,1} + 0,4 + 1 \right) \cdot \frac{1^2}{2} \rightarrow hf = 1,08 \frac{m^2}{s^2}$$

Friktionsförlusterna beror på expansion och kontraktion, då övriga termer är konstanta. Det tryckfall som uppstår i rören uppkommer till följd av friktionsförlusterna.

$$\Delta p_f = \rho g \Delta Z_f = \rho h_f = 1000 \frac{kg}{m^3} \cdot 1,08 \frac{m^2}{s^2} = 1080 \frac{N}{m^2}$$

$$P = \frac{q \cdot \Delta p_f}{\eta} = \frac{3,6 \cdot 1080 \frac{m^3}{s} \cdot \frac{N}{m^2}}{0,7} \approx 5569 W$$

Den effekt som tillförs måste kompensera tryckfallet som uppstår och den verkningsgrad

(0,7) som pumparna har.

Driftkostnaden per år beräknas med antagandet att en kWh kostar en kr. Kostnaden för rören baseras på en återbetalningstid på 50 år, en meterkostnad på 5728 kr samt en påläggsfaktor av värdet 2. Detta ger en driftkostnad på:

$$5569 W \cdot 24 \text{ timmar} \cdot 365 \text{ dagar} \cdot 1 \text{ kr} \approx 48784 \text{ kronor}$$

Investeringsbehovet för alla 495 reningsverk baseras på alla fasta kostnader multiplicerat med en påläggsfaktor. De fasta kostnaderna inkluderar plattformar, rör, fällnings/flockningskemikalier, samt bassängerna. Byggkostnaden för fosforanläggningen är 90 miljoner kronor [9] och luftningsanläggningen antas vara cirka 90 miljoner kronor. Detta medför ett totalt investeringsbehov på 975 miljarder kronor.

Räntan per år beräknas som ett medelvärde mellan första årets ränta (19,5 miljarder kr) och sista årets ränta (0 kr) och är 9,8 miljarder kr.

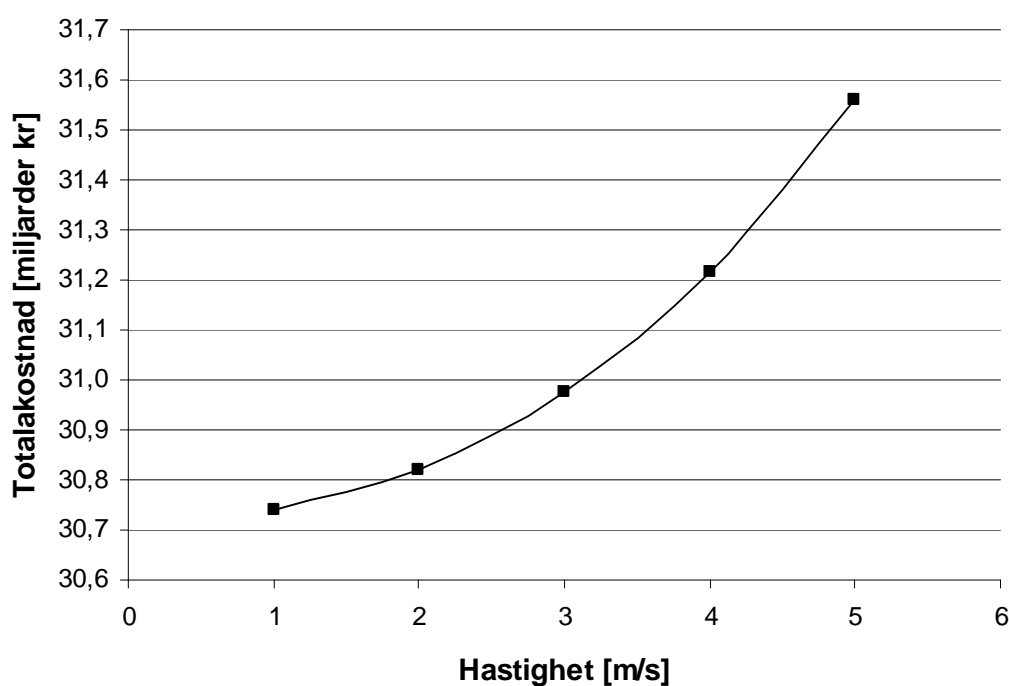
Den totala kostnaden per år fås genom att addera driftkostnaden (1,5 miljarder kronor), investeringsbehovet och räntan genom 50 år. Detta ger en årlig kostnad på 30,7 miljarder

Samma beräkningsgång har använts för hastigheterna 2,3,4 och 5 m/s, för mer detaljerade beräkningar se bilaga 11.4.

### 5.5.3 Resultat

Tabell 4. Kostnaden per år och investeringsbehovet för reningsverket, i miljarder kr

Hastighet [m/s]	1	2	3	4	5
Rörets diameter [m]	2,1	1,5	1,25	1,1	0,96
Fast kostnad	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3
Driftkostnad	1,47	1,55	1,71	1,96	2,30
Total kostnad	30,7	30,8	30,9	31,2	31,5
Investeringsbehov	975	975	975	975	975



Figur 10. Totala kostnaden för reningsverket vid olika hastigheter.

### 5.5.4 Slutsats

Tabell 4 och figur 10 visar att, om man ska syresätta och samtidigt rena hela Östersjöns bottenvatten under en period av 50 år med ett flöde på  $3,6 \text{ m}^3/\text{s}$ . Kommer det att behövas 495 stycken reningsanläggningar med en rördiameter på 2,1 m och en hastighet på 1 m/s. Detta ger en lägsta totalkostnad på 30,7 miljarder kr om året. Dessutom tillkommer omkostnader som personal, fraktning av kemikalier och slam som bildas när vattnet renas från fosfor.

### 5.5.5 Diskussion

Att rena vattnet från fosfor kan vara en bra idé under ett par år. Vattnet syresätts samtidigt som det renas, vilket i sin tur kommer leda till att den resterande fosfor binds in i sedimenten. Den största anledningen till att rena vattnet från fosfor är att förhindra de kraftiga

algbloomingarna som brukar ske varje år. När det mesta av fosfor är bundet till sedimenten och de stora algbloomingarna inte blir lika kraftiga, kan man sluta rena vattnet från fosfor och endast syresätta bottenvattnet. Detta kan i sin tur leda till att man kanske kan reducera antalet plattformar. Detta kommer då att leda till en del kostnadssänkningar, bland annat kommer kostnaden för fällnings/flockningskemikalien att försvinna.

För att undersöka om metoden i huvudtaget ger önskad effekt kunde det vara lämpligt att först prova i mindre skala vid till exempel ett av de stora djupen. Detta även för att se eventuella konsekvenser som metoden skulle kunna medföra. Något som kan vara bra att tänka på är: Hur skulle cirkulationen med vattnet från bottenarna se ut, kommer vi att pumpa upp nytt syrefattigt vatten eller kommer det vatten som behandlats att tas upp igen? Hur kommer livet att se ut runt dessa stora plattformar och vilka skulle konsekvenserna bli?

## 6 Jämförelse mellan lösningarna

Tabell 5. Visar en jämförelse mellan de olika alternativen, i miljarder kr.

Metod	Årlig kostnad	Totalt investeringsbehov	Antal kärnkraftverk som behövs
Tunnel	70,5	1280	1,63
Pipelines	67,9	1890	1,27
Saltkaret	Ej genomförbar	Ej genomförbar	Ej genomförbar
Rening + syresättning	30,7	975	0,0057

## 7 Slutsats

Tre av de lösningar som vi har räknat på går att genomföra tekniskt, den lösning som är omöjlig att genomföra är Saltkaret. Den begränsande faktorn är mängden salt som behövs, den överskrider totala världsproduktionen.

Ekonomiskt sett är de tre kvarvarande alternativen mycket kostsamma, se tabell 5.

Alternativet med rening av fosfor och syresättning har dock det lägsta investeringsbehovet och den lägsta kostnaden.

## 8 Diskussion

Även om reningsverket är det mest lämpliga alternativet ur ekonomisk och teknisk synvinkel, kanske det inte är det ur biologisk då det krävs så många som 495 stycken reningsverk för att lyckas rena och syresätta Östersjöns bottenvatten under de 50 år som vi begränsat oss till. Samtidigt som man förstår att ett projekt som detta medför stora negativa konsekvenser så vet vi inte idag exakt *vilka* konsekvenser man pratar om. Vad man säkerligen kan tänka sig är att stora mängder fosfor som finns löst i bottenvattnet på grund av syrebristen kommer att komma upp till ytan då bottenvattnet rörs om vid montering av plattformarna. Detta leder i sin tur till ökad algblooming under några år. När reningsverken sen är på plats uppstår ett annat problem. Hur ska man hantera all den mängd slam som bildas vid varje reningsverk då man renar bottenvattnet från fosfor? Kommer man ha möjlighet att återanvända fosfor som ett näringsämne inom jordbruket och vad kostar det i så fall att driva ur allt vatten som finns i slammet? Om denna möjlighet inte är genomförbar, vad ska man då göra? En positiv aspekt när det gäller just plattform med reningsverk är att när man väl lyckats syresätta bottenarna så kommer man kunna reducera reningen av fosfor och bara låta syresättningen av bottenvattnet

finnas kvar i den mån det behövs. Syret gör ju så att fosfor inte löser ut sig ur sedimentet. Om man istället skulle använda sig av tunnlar eller pipelines för att på så sätt syresätta bottenarna tillkommer andra aspekter som man måste ha i åtanke. En sak kan till exempel vara att när man pumpar in mer saltvatten under haloklinen kommer det gamla bottenvattnet att tryckas upp till ytan. Det leder till att fosforhalten i ytvattnet kommer att öka. Som en direkt följd av den förhöjda fosforhalten kommer det ske mer omfattande algbloomningar under någon sommar, men det är något man måste räkna med. Efterhand som syrehalten i bottenvattnet ökar kommer fosfor att sluta läcka ut ur sedimenten och algbloomningarna kommer att upphöra. Om salthalten ökar eller haloklinen stiger på grund av den större mängden saltvatten som pumpas in, är svårt att avgöra. Även om så skulle vara fallet, skulle det då ha någon betydelse? Torsken, som är en viktig art i Östersjön, är en marin art som säkerligen inte skulle störas om salthalten ökade. Detsamma gäller för övriga marina arter som finns i Östersjön. De sötvattensarter som finns skulle däremot inte klara en högre salthalt, för dem är det bräckta vattnet tillräckligt svårt att överleva i. Alla de alternativ som vi har räknat på är genomförbara, även om de kanske är mer lämpade för mindre områden och flöden. Det kanske går att använda de olika lösningarna på bara en djuphåla för att se om de överhuvudtaget fungerar. Som lösningarna är nu kräver de väldigt mycket material och utrymme, som exempel kan nämnas de 1576 (!) stycken pipelines. Hur mycket plats tar inte de? Det kanske går att kombinera olika lösningar, ha en tunnel genom Skåne samtidigt som vattnet renas lite längre norrut. På så sätt kan utbytet av bottenvattnet påskyndas och det krävs inte lika många av varje (tunnlar och plattformar).

Man måste dock komma ihåg att det inte räcker med en sådan här lösning för att rädda Östersjön, det allra viktigaste är att minska utsläppen. Alla de länder som finns inom Östersjöns tillrinningsområde måste hjälpas åt. Reningsverk måste byggas och förbättras, mängden gödsel som används inom jordbruket måste minska och de fartyg som kör på Östersjön måste få bättre avgasrening. Om inte alla hjälps åt kommer det inte ha någon betydelse om vi kommer på en briljant idé. De länder som har bra reningsteknik måste hjälpa de länder som har mindre bra teknik och det är viktigt att alla strävar mot samma mål. Även om alla länder imorgon skulle ha åtgärdat alla sina problem med rening, gödselanvändning och avgasrening skulle det inte synas någon förändring i Östersjön på många år, precis som baklåshypotesen säger, det kanske inte syns någon förändring under vår livstid. Däremot blir det inte heller sämre, utan våra barnbarn kan fortfarande bada och äta fisken. Gör vi ingenting kanske Östersjön slutar som en slemmig sörja som ingen har någon glädje av och det vill vi inte ha på vårt samvete.

Några andra reparativa åtgärder som tidigare genomförts på sjöar med syfte att sänka fosforhalten och som kanske kan, efter viss anpassning och dimensionering, tillämpas vid restaurering av Östersjön:

- Muddring som innebär att det näringsberikade sedimentet som läcker fosfor pumpas till en bassäng där fosfor fälls ut med kemikalier.
- Vegetationsborttagning
- Riploxmetoden, vilket innebär reducering av den interna fosforbelastningen genom oxidering av sedimentet med hjälp av kemikalier.
- Hypolimnionluftning som innebär att man pumpar ner ren syrgas i det djupare skiktet.
- Biomanipulering i form av växtplanktonminskning som genomförs genom att fiska ut djurplanktonätande fisk som dominerar i en övergödd sjö. Mängden djurplankton som äter växtplankton ökar och vattnet blir klarare. [8]

## 8.1 Vilda idéer

Det finns många fler idéer än de vi har räknat på som man kan tänka sig som en lösning på problemet. Här följer några av de "vilda idéer" vi har fått under projektets gång.

Vi har i projektet fokuserat på att rena hela Egentliga Östersjöns bottenvatten under haloklinen. Detta innebär stora flöden och stora kostnader. Skulle det gå att rikta in sig mer specifikt? Vår idé är att endast koncentrera sig på att rädda torsken genom att syresätta det vattenskikt där rommen utvecklas. Genom att leda in en tunnel/pipeline vid rätt salthalt kan just denna effekt uppnås. Dessutom blir volymen som ska syresättas mycket mindre och kostnaderna blir därmed också lägre. Man kommer då åt ett akut problem och kan under tiden fundera på mer omfattande åtgärder.

En annan idé, som blir en blandning mellan saltkaret och tunneln, är att frakta saltvatten från västkusten med "supertankers" och sedan leda ner det i Östersjön. Dessa "supertankers" skulle då gå i skytteltrafik mellan Östersjön och västkusten. I Östersjön står plattformar, som de som används till Saltkaret, där "supertankers" lämnar sitt saltvatten. Från plattformen pumpas vattnet ner under haloklinen. Man kan anta att det behövs ett stort antal av dessa tankers för att det skulle bli någon effekt.

## 9 Beteckningar

Tabel 6. Beteckningar, storheter och enheter [1]

D	diameter	m
E	energi	J, Nm
g	gravitationskonstant	m/s <sup>2</sup>
$h_f$	friktionsförlust	J/kg, m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>
k	sandråhet	m
$K_c$	förlust på grund av sektionminskning	
$K_e$	förlust på grund av sektionökning	
$K_f$	förlust på grund av rördetalj (böjningar, slussen, ventiler och kopplingar)	
L	längd	m
$N_{Re}$	Reynolds tal	
p	tryck	Pa, N/m <sup>2</sup>
P	effekt	W
q	volymflöde	m <sup>3</sup> /s
S	tvärsnittsarea	m <sup>2</sup>
v	volym	m <sup>3</sup>
V	hastighet	m/s
$W_p$	energi som pump tillför	J/kg, m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>
$Z_a-Z_b$	höjdskillnad	m
$\alpha$	korrektionsfaktor	
$\eta$	verkningsgrad	
$\mu$	dynamiska viskositet	Ns/m <sup>2</sup>
$\rho$	densitet	kg/m <sup>3</sup>
$\Delta p_f$	friktionsstryckfallet	N/m <sup>2</sup>

## 10 Referenser

### 10.1.1 Litteratur

- [1] McCabe, W.L., J.C. Smith & P. Harriot, Unit operations of chemical engineering, 6<sup>th</sup> ed. McGraw-Hill, New York, 2001. ISBN: 0-07-118173-3
- [2] Rohde, J., The Baltic and North Seas: a process-oriented review of the physical oceanography coastal segment (20,S). In: The Sea, Robinson, A.R. & K. Brink (eds.), Vol. 11. John Wiley & Sons, Inc. 1998. pp. 699-731. ISBN: 0-471-11545-2
- [3] Stephenson, D. Pipeline design for water engineers. Elsevier Science Publishing Company INC, 1989. ISBN: 0-444-87373-2

### 10.1.2 Internet och personer

- [4] Department of mechanical and industrial engineering, University of Thessaly, <http://www.mie.uth.gr/labs/mex-lab/Projects/pics/B1-2.jpg>, 2006-03-10
- [5] GVA Consultants, [www.gvac.se](http://www.gvac.se), 2006-02-27, Robert Ludvigsson
- [6] Himmerfjärdsverket, [www.SYVAB.se](http://www.SYVAB.se), 2006-02-15
- [7] National Encyklopedin, [www.ne.se](http://www.ne.se), 2006-02-16
- [8] Naturvårdsverket, [www.naturvardsverket.se](http://www.naturvardsverket.se), "Miljö kvalitetsnormer för fosfor i sjöar", Rapport 5288 juni 2003, ISBN 91-620-5288-8, 2006-01-31
- [9] Nordic Water, [www.nordicwater.se](http://www.nordicwater.se), 2006-02-21
- [10] O<sub>2</sub>-gruppen, [www.o2gruppen.se](http://www.o2gruppen.se), 2006-03-08
- [11] Salt Institute, <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/salt/580303.pdf>, 2006-02-15
- [12] SMHI, [www.SMHI.se](http://www.SMHI.se), 2006-02-20
- [13] Stockholms marina forskningscentrum, <http://www.smf.su.se/havet/faktaostersjon.html#>, 2006-03-10
- [14] Svenska Naturskyddsföreningen, [www.snf.se](http://www.snf.se), 2006-02-23
- [15] Östersjöportalen, <http://www.fimr.fi/sv/itametikanta.html>, "Östersjön reagerar långsamt till miljövårdsåtgärderna", 2006-03-08
- [16] Eriksson Stig, Skanska, stig.eriksson@skanska.se, 2006-02-13
- [17] Hansson Martin, SMHI, martin.hansson@smhi.se, 2006-02-20
- [18] Loberg Jonas, Reinertsen Sverige AB, jonas.loberg@reinertsen.se, 2006-03-20
- [19] Stattin Jan, Skanska, jan.stattin@skanska.se, 2006-02-14
- [20] Vedin Janne, Kemiteknik, KTH, 2006-02-03

## 11 Bilagor

### 11.1 Beräkningar – Tunnel

Storheter	Enheter	Antagande
Volym <sub>bottenvatten</sub>	km <sup>3</sup>	2810
Tid	år	50
Längd	km	200
$\rho_{\text{vatten}}$	kg/m <sup>3</sup>	1000
$\mu_{\text{vatten}}$	Ns/m <sup>2</sup>	1,0*10 <sup>-3</sup>
$k_{\text{tunnel}}$	m	0,01-0,001
$Z_a-Z_b$	m	60
$K_f = K_e = K_c$		0
$\eta$		0,7
Kostnader	kr/kWh	1
Kärnkraftverk, energiproduktion	GW	1

**Alternativ 1** med  $V = 1 \text{ m/s}$  &  $n_{\text{tunnel}} = 1 \text{ st}$

$$q = \frac{v_{\text{vatten}}}{t} = \frac{2810[\text{km}^3]}{50[\text{år}]} = 56,2 \text{ km}^3/\text{år}$$

$$q = 56,2 \cdot 10^9 / (365 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60) = 1782 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$S_1 = \frac{q}{V}$$

$$D = \left(\frac{S \cdot 4}{\pi}\right)^{0,5} = \frac{1782,09}{\pi} \approx 47,6 \text{ m}$$

**Alternativ 2** med  $D = 10 \text{ m}$  &  $V = 1 \text{ m/s}$

$$S_2 = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{\pi \cdot 10^2}{4} = 78,5 \text{ m}^2$$

$$n_{\text{tunnel}} = \frac{S_1}{S_2} = \frac{1782,09}{78,5} = 22,69 \approx \mathbf{23 \text{ st}}$$

$f = f(N_{\text{Re}}, \frac{k}{D})$  Friktionsfaktorn är en funktion av Reynolds tal och  $\frac{k}{D}$ , där  $k$  är sandråheten för betong

$$N_{\text{Re}} = \frac{D \cdot V \cdot \rho}{\mu} = \frac{10 \cdot 1 \cdot 1000}{10^{-3}} = 1,0 \cdot 10^7$$

$k_{\text{tunnel}} = 0,01-0,001$  för betong, därför får vi två olika  $f$ -värden

vid  $k_{\text{tunnel}} = 0,01$  blir  $\frac{k}{D} = \frac{0,01}{10} = 0,001$  linje ger  $f = 0,003$



vid  $k_{\text{tunnel}} = 0,001$  blir  $\frac{k}{D} = \frac{0,001}{10} = 0,0001$  linje ger  $f = 0,005$

Medelvärde på friktionsfaktorn blir då:

$f_{\text{medel}} = (0,003 + 0,005) / 2 = 0,004$  en används sedan för beräkning av förlust termen  $h_f$

$$h_f = \left(4f \frac{L[m]}{D[m]}\right) \cdot \frac{V^2[m]}{2} = \left(4 \cdot 0,004 \cdot \frac{200000}{10}\right) \cdot \frac{1^2}{2} \approx 160 \text{ m}^2/\text{s}^2$$

$$\Delta p_f = \rho g \Delta Z_f = \rho h_f = \rho [kg/m^3] \cdot 4 \cdot f \cdot \frac{L[m]}{D[m]} \cdot \frac{V^2[m/s]}{2} = 160 \cdot 1000 = 160\,000 \text{ N/m}^2$$

$$P = \frac{q[m^3/s] \cdot \Delta p_f [N/m^2]}{\eta} = \frac{1782 \cdot 160000}{0,7} = 4,07 \cdot 10^8 \text{ W}$$

Antal kärnkraftverk som behövs för att försörja tunnelarna med energi:

$$4,07 \cdot 10^8 = 0,4 \cdot 10^9 \Rightarrow 0,4 \text{ kärnkraftverk}$$

### Kostnader för alternativ 2

Driftkostnader

$$\frac{4,07 \cdot 10^8 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 1}{1000} = 3,57 \cdot 10^9 \text{ kr/år}$$

**Investeringsbehovet** för 23 tunnlar

$$80 \cdot 10^9 \cdot 2 \cdot 23 = 3,68 \cdot 10^{12} \text{ kr}$$

Ränta  $\approx 2\%$

år 1  $3,68 \cdot 10^{12} \cdot 0,02 = 73,6 \cdot 10^9 \text{ kr}$

År 50  $0 \text{ kr}$

$$\text{Medel} = \frac{73,6 \cdot 10^9 + 0}{2} = 36,8 \cdot 10^9 \text{ kr/år}$$

$$\text{Byggningskostnader} = \frac{3,68 \cdot 10^{12}}{50} + 36,8 \cdot 10^9 = 1,104 \cdot 10^{11} \text{ kr/år}$$

$$\text{Tot}_{\text{kost}} = 1,104 \cdot 10^{11} + 3,57 \cdot 10^9 \approx 114 \cdot 10^{11} \text{ kr/år}$$

De andra alternativen med hastighet 2 m/s, 3 m/s, 4 m/s och 5 m/s beräknades på samma sätt.

## 11.2 Beräkningar - Pipeline

Storheter	Enheter	Antagande
Volym <sub>bottenvatten</sub>	km <sup>3</sup>	2810
Tid	år	50
Längd	km	100
$\rho_{\text{vatten}}$	kg/m <sup>3</sup>	1000
$\mu_{\text{vatten}}$	Ns/m <sup>2</sup>	$1,0 \cdot 10^{-3}$
$k_{\text{pipeline}}$	m	smooth
$K_f = K_e = K_c$		0
$\eta$		0,7
Elpris	kr/kWh	1
Kärnkraftverk, energiproduktion	GW	1

**Alternativ 1**  $V = 1 \text{ m/s}$

$S_1 = 1782 \text{ m}^2$  samma area som för tunnel eftersom samma flöde ska transporteras

$$S_2 = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{\pi \cdot 1,2^2}{4} = 1,13 \text{ m}^2$$

Antalet pipelines som behövs beräknas genom att dividera den totala arean som behövs med arean för en pipeline:

$$n_{\text{pipeline}} = \frac{S_1}{S_2} = \frac{1782}{1,13} \approx 1576 \text{ st}$$

$f = f(N_{\text{Re}}, \frac{k}{D})$  Friktionsfaktorn är en funktion av Reynolds tal och  $\frac{k}{D}$ , där  $k$  är råhetsfaktor för stål

$$N_{\text{Re}} = \frac{D \cdot V \cdot \rho}{\mu} = \frac{1,2 \cdot 1 \cdot 1000}{10^{-3}} = 1,2 \cdot 10^6$$

$k_{\text{pipeline}} = 0,00015$  för stål ger

$$\frac{k}{D} = \frac{0,00015}{1,2} = 0,000125 \text{ linje ger } f = 0,003$$

$f = 0,003$  används sedan för beräkning av förlusttermen  $h_f$

$$h_f = (4f \frac{L[m]}{D[m]}) \cdot \frac{V^2[m/s]}{2} = (4 \cdot 0,003 \cdot \frac{100000}{1,2}) \cdot \frac{1^2}{2} \approx 500 \text{ m}^2/\text{s}^2$$

Tryckfallet på grund av friktionsförlusterna beräknas genom:

$$\Delta p_f = \rho g \Delta Z_f = \rho h_f = \rho [kg/m^3] \cdot 4 \cdot f \cdot \frac{L[m]}{D[m]} \cdot \frac{V^2[m/s]}{2} = 500 \cdot 1000 = 500\,000 \text{ N/m}^2$$

Den effekt som krävs måste kompensera för tryckfallet och för verkningsgraden:

$$P = \frac{q[m^3/s] \cdot \Delta p_f [N/m^2]}{\eta} = \frac{1782 \cdot 500000}{0,7} = 12,7 \cdot 10^8 \text{ W}$$

Antal kärnkraftverk som behövs för att förse tunnlarna med energi:

$$12,7 \cdot 10^8 = 1,27 \cdot 10^9 \Rightarrow 1,27 \text{ kärnkraftverk}$$

### **Kostnader för alternativ 1**

Driftkostnader

$$\frac{12,7 \cdot 10^8 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 1}{1000} = 11,15 \cdot 10^9 \text{ kr/år}$$

Kostnaden per meter pipeline har beräknats genom ett fast meterpris multiplicerat med påslagsfaktorn, beräkningsgången följer nedan

$$\text{Kostnad / pipeline} = 6000 \cdot 2 \cdot 100000 = 1,2 \cdot 10^9 \text{ kr}$$

$$\text{Investeringsbehovet} = 1,2 \cdot 10^9 \cdot 1576 = 1891,2 \cdot 10^9 \text{ kr}$$

$$\begin{array}{lll} \text{Ränta} \approx 2 \% & \text{år 1} & 1891,2 \cdot 10^9 \cdot 0,02 = 37,8 \cdot 10^9 \text{ kr} \\ & \text{År 50} & 0 \text{ kr} \end{array}$$

$$\text{Medel} = \frac{37,8 \cdot 10^9 + 0}{2} = 18,9 \cdot 10^9 \text{ kr / år}$$

Kostnaden för pipelines beräknas genom att addera investeringsbehovet delat med 50 år med räntan

$$\text{Pipeline}_{\text{skostnad}} = \frac{1891,2 \cdot 10^9}{50} + 18,9 \cdot 10^9 = 56,7 \cdot 10^9 \text{ kr / år}$$

Den totala kostnaden beräknas genom kostnaden för pipelines + driftkostnaden

$$\text{Tot}_{\text{kost}} = 56,7 \cdot 10^9 + 11,15 \cdot 10^9 \approx 67,9 \cdot 10^9 \text{ kr / år}$$

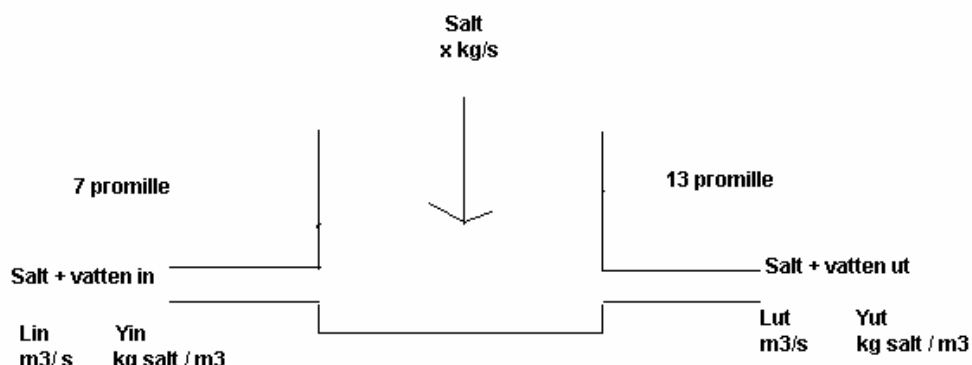
De andra alternativen med hastighet 2 m/s, 3 m/s, 4 m/s och 5 m/s beräknades på samma sätt.

### 11.3 Beräkningar – Saltkaret

Storheter	Enheter	Antagande
Volym bottenvatten	km <sup>3</sup>	2810
Tid	år	50
Längd	m	60
v	m/s	1
K <sub>e</sub>		0,4
K <sub>c</sub>		1
η		0,7
f		0,007
q <sub>tot</sub>	m <sup>3</sup> /s	1782
q <sub>max</sub>	m <sup>3</sup> /s	3,6
Mängd fällningskemikalie	g/m <sup>3</sup>	25
Kostnad för fällningskemikalie	kr/ton	1200
Byggkostnad fosfor anläggning	kr	90 · 10 <sup>6</sup>
Byggkostnad luftnings anläggning	kr	90 · 10 <sup>6</sup>
Driftkostnad för båda bassängerna	kr/år	2920000
Totala världsproduktionen av salt	ton/år	225 · 10 <sup>6</sup>
Kostnad för salt	kr/ ton	48
Kostnad per plattform (baserad på 3600 m <sup>3</sup> vatten)	kr	720 · 10 <sup>6</sup>
Ränta	%	2
Påläggsfaktor		2

Salt mängd som behövs tillsätts till vattnet för att få lämplig mängd.

Denna beräkning är baserad på ett saltkar, slut summan ska gångas med 495 stycken reningsverk. Beräkningarna är för en tank.



Härledning av ekvationen för att få fram mängden salt:

$$\text{salt}_{in} = \frac{L_i \cdot m^3 \cdot Y_i \cdot \text{kg}}{s \cdot m^3} = \frac{L_i \cdot Y_i \cdot \text{kg}}{s}$$

$$\text{Salt}_{ut} = \frac{L_u \cdot m^3 \cdot Y_u \cdot \text{kg}}{s \cdot m^3} = \frac{L_u \cdot Y_{ui} \cdot \text{kg}}{s}$$

$$\text{Salt}_{in} + \text{Salt}_{ut} = \text{Salt}_{uLU}$$

$$\frac{L_i \cdot Y_i \cdot \text{kg}}{s} + \frac{x \text{ kg}}{s} = \frac{L_u \cdot Y_{ui} \cdot \text{kg}}{s}$$

$$\frac{L_u \cdot Y_{ui} \cdot \text{kg}}{s} - \frac{L_i \cdot Y_i \cdot \text{kg}}{s} = \frac{x \text{ kg}}{s}$$

Promille betyder tusendel vilket ger 1 kg salt per 1000 kg vatten

$$\text{Promille} = \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ kg}}$$

Densiteten för saltvatten kan antas vara densamma som för vanligt vatten:

$$\rho \sim \frac{1000 \text{ kg}}{m^3}$$

Den salthalt i det bräckta vattnet som pumpas in i tankreaktorn:

$$Y_i = \frac{7 \cdot \text{kg} \cdot 1000 \cdot \text{kg}}{1000 \text{ kg} \cdot m^3} = \frac{7 \text{ kg}}{m^3}$$

Den salthalt som finns i bottenvattnet:

$$Y_i = \frac{13 \cdot \text{kg} \cdot 1000 \cdot \text{kg}}{1000 \text{ kg} \cdot m^3} = \frac{13 \text{ kg}}{m^3}$$

Salt som skall tillsättas det bräckta vattnet för att på så sätt uppnå samma salthalt som bottenvattnet:

$$\frac{L_u \cdot Y_{ui} \cdot \text{kg}}{s} - \frac{L_i \cdot Y_i \cdot \text{kg}}{s} = \frac{x \text{ kg}}{s} \rightarrow \frac{3,6 \cdot 13 \cdot \text{kg}}{s} - \frac{3,6 \cdot 7 \cdot \text{kg}}{s} = \frac{21,6 \text{ kg}}{s}$$

21,6 kg/s salt motsvarar  $6,8 \cdot 10^5$  ton salt per år och saltkar

Kostnaden för salt exklusive kringkostnader:

$336 \cdot 10^6$  ton salt per år  $\cdot 48$  kr  $\approx 16$  miljarder kr per år

### 11.4 Beräkningar – Reningsverket

Hastighet (m/s)	Diameter (m)	Pris (kr/m)
1	2,1	~ 5728
2	1,50	~ 4091
3	1,25	~ 3409
4	1,1	~ 3000
5	0,96	~ 2618

Mängd vatten som ska renas per år

$$\frac{2,81 \cdot 10^{12} m^3}{50 \text{år}} = 5,62 \cdot 10^{10} m^3 / \text{år}$$

Mängd fällnings/flocknings kemikalie som skulle behöva användas

$$25 g / m^3 \cdot 5,62 \cdot 10^{10} m^3 / \text{år} \cdot 10^{-6} = 1,40 \cdot 10^6 \text{ ton} / \text{år}$$

Kostnad för fällningskemikalie per år

$$1,40 \cdot 10^6 \text{ ton} / \text{år} \cdot 1200 \text{kr} / \text{ton} = 1,68 \text{ Miljarder} / \text{år}$$

Flöde [ $m^3/s$ ] som skall behandlas under 50 år:

$$\frac{2,81 \cdot 10^{12}}{1,5768 \cdot 10^9} \cdot \frac{m^3}{s} = 1782,1 m^3 / s$$

Antal plattformar som kommer att behövas baserat på ett max flöde av  $3,6 m^3$ :

$$\text{Plattformar} = \frac{q_{\text{tot}}}{q_{\text{max}}} \rightarrow \frac{1782 m^3 / s}{3,6 m^3 / s} = 495 \text{ stycken}$$

Investeringsbehovet för plattformar:

720 miljoner kr  $\cdot 495$  plattformar = 356 miljarder kr

Hastigheten i rören är baserad på 1 m/s

Tvärsnittsarean för rör

$$S = \frac{q}{V} = \frac{3,6 m^3 / s}{1 m / s} = 3,6 m^2$$

Rördiameter:

$$D = \sqrt{\frac{S \cdot 4}{\pi}} = \sqrt{\frac{3,6 m^2 \cdot 4}{3,14}} = 2,1 m$$

Reynolds ekvation för 1 m/s

$$N_{Re} = \frac{D \cdot V \cdot \rho}{\mu} \rightarrow \frac{2,1 \cdot 1 \cdot 1000}{1 \cdot 10^{-3}} = 2,1 \cdot 10^6$$

Sandråheten då det är betong är 0,01-0,001, vilket ger ett medelvärde på sandråheten på 0,0055.

$$\frac{k}{D} = \frac{0,0055}{2,1} = 0,0026 \rightarrow f \approx 0,006$$

Hastighet [m/s]	Diameter [m]	Reynolds tal	k/D	f
2	1,50	$3 \cdot 10^6$	0,0037	0,007
3	1,25	$3,75 \cdot 10^6$	0,0044	0,007
4	1,1	$4,4 \cdot 10^6$	0,005	Inget värde
5	0,96	$4,8 \cdot 10^6$	0,0057	Inget värde

Då medelvärdet av de tre givna f-värdena uppskattades till 0,007, användes detta värde i beräkningarna.

Då tvärsnittsarean för bassängen ( $S_a$ ) är mycket större än rörets tvärsnittsarea ( $S_b$ ) blir kontraktionsfaktorn lika med 0,4

$$K_c = 0,4 \left( 1 - \frac{S_b}{S_a} \right)$$

Då tvärsnittsarean för rörets ( $S_a$ ) är mycket mindre än bassängens tvärsnittsarea ( $S_b$ ) blir expansionsfaktorn lika med 1

$$K_e = \left( 1 - \frac{S_a}{S_b} \right)^2$$

Följande totala friktionsförluster i rören beräknas till:

$$h_f = \left( \left( 4f \frac{L}{D} \frac{m}{m} \right) + K_c + K_e \right) \cdot \frac{V^2}{2} \left( \frac{m}{s} \right)^2 \Rightarrow$$

$$h_f = \left( 4 \cdot 0,007 \cdot \frac{60}{2,1} + 0,4 + 1 \right) \cdot \frac{1^2}{2} \rightarrow hf = 1,08 \frac{m^2}{s^2}$$

Det tryckfall som uppstår i rören uppkommer till följd av friktionsförlusterna.

$$\Delta p_f = \rho g \Delta Z_f = \rho h_f = 1000 \frac{kg}{m^3} \cdot 1,08 \frac{m^2}{s^2} = 1080 \frac{N}{m^2}$$

$$P = \frac{q \cdot \Delta p_f}{\eta} = \frac{3,6 \cdot 1080 \frac{m^3}{s}}{0,7} \cdot \frac{N}{m^2} \approx 5569 \cdot W$$

Den effekt som tillförs måste kompensera tryckfallet som uppstår och den verkningsgrad som pumparna har.

För att räkna ut antalet kärnkraftverk tar man effekten för rör samt effekten för att driva anläggningarna. Rörens effekt multipliceras med två eftersom det handlar om två rör vilket blir 11138 W. Effekten för anläggningen är 333 W. (2,92 miljoner kronor dividerat med

$365 \cdot 24 \cdot 1 = 333 \text{ W}$ ). De båda effekterna adderas och multipliceras sen med antalet plattformar (495 st) Detta ger en sammanlagd effekt på  $5,68 \cdot 10^6 \text{ W}$

Antal kärnkraftverk som behövs för att förse reningsverken med energi:

$$5,68 \cdot 10^6 = 0,00568 \cdot 10^9 \Rightarrow 0,00568 \text{ kärnkraftverk}$$

Driftkostanden per rör:  $5,569 \text{ kW} \cdot 24 \text{ timmar} \cdot 365 \text{ dagar} \cdot 1 \text{ kr} \approx 48784 \text{ kronor}$

Investeringsbehovet för alla 495 reningsverk

$$((\text{Rörkostnad kr} \cdot 2 \text{ stycken} + \text{plattform kr} + \text{anläggning kr}) \cdot \text{påläggsfaktor} \cdot \text{antalet plattformar}) + \text{kemikaliekostnad} = 975 \text{ miljarder}$$

Totalkostnaden för alla 495 stycken plattformar per år:

$$\frac{\text{Investeringsbehovet}}{50 \text{ år}} \rightarrow \frac{975 \cdot 10^9}{50} = 19,5 \cdot 10^9 \text{ kr/år}$$

Räntan beräknas till:

$$\text{Investeringsbehovet} \cdot \text{ranta} = 975 \cdot 10^9 \cdot 0,02 = 19,5 \cdot 10^9 \text{ kr}$$

Medelräntan per år:

$$\frac{19,5 \cdot 10^9}{2} = 9,8 \cdot 10^9 \text{ kr}$$

Den totala fasta kostnaden per år är:

$$\text{Medelränta} + \text{investeringsbehov per år} = 9,8 \cdot 10^9 + 19,5 \cdot 10^9 = 29,3 \cdot 10^9 \text{ kr/år}$$

Totala kostnaden för alla reningsverken per år är:

$$\text{Fasta kostnader} + (\text{driftkostnader för rör och anläggning}) \cdot 495 = 30,7 \text{ miljarder kr}$$

Samma beräkningsgång har använts för hastigheterna 2,3,4 och 5 m/s.